Newtons Axiome

1. Masse, Beschleunigung und Kraft: Die Newtonschen Gesetze
   - Zielpunkt: Was ist Kraft? Und was ist Masse?
   - Newtons 3 Gesetze
   - Historisches
   - Erdanziehung, Fallbeschleunigung und Masse

1. Masse, Beschleunigung und Kraft: Die Newtonschen Gesetze
   - Zielpunkt: Was ist Kraft? Und was ist Masse?
   - Newtons 3 Gesetze
   - Historisches
   - Erdanziehung, Fallbeschleunigung und Masse

Was weiß unsere Black Box nun?

- Wir fliegen weiterhin mit unserem Raumschiff durchs All.
- Unsere neugierige künstliche Intelligenz hat ein bisschen was gelernt:
  - Wie sprechen wir präzise über den Ort von etwas?
  - Wie beschreiben wir Ortsveränderungen mit der Zeit?
    - $\rightarrow$ Das ist die Geschwindigkeit.
  - Wie beschreiben wir Geschwindigkeitsänderungen mit der Zeit?
    - $\rightarrow$ Das ist die Beschleunigung.
- Seine nächste Frage lautet:
  - Nach welchen Gesetzen bewegen sich die Dinge durch den Raum?
- Bisher haben wir nur Definitionen besprochen.
- Nun kommt endlich Physik: Zwei eng verflochtene Begriffe:
  - Was ist Masse?
  - Was ist Kraft?

Kugeln in der Schwerelosigkeit

- Wir zeigen ihm 3 Kugeln. Diese heißen ***a***, ***b*** und ***c***.
- Wir lassen diese einfach mal los.
- Was wird passieren? Wie werden sie sich bewegen?

Kugeln in der Schwerelosigkeit

- Wir zeigen ihm 3 Kugeln. Diese heißen ***a***, ***b*** und ***c***.
- Wir lassen diese einfach mal los.
- Was wird passieren? Wie werden sie sich bewegen?
  - Falls sie sich anfangs bewegen, fliegen sie einfach immer weiter.

Kugeln in der Schwerelosigkeit

- Wir zeigen ihm 3 Kugeln. Diese heißen ***a***, ***b*** und ***c***.
- Wir lassen diese einfach mal los.
- Was wird passieren? Wie werden sie sich bewegen?
  - Falls sie sich anfangs bewegen, fliegen sie einfach immer weiter.
  - Falls sie anfangs ruhen, bleiben sie ewig liegen.

Kugeln in der Schwerelosigkeit

- Wir zeigen ihm 3 Kugeln. Diese heißen ***a***, ***b*** und ***c***.
- Wir lassen diese einfach mal los.
- Was wird passieren? Wie werden sie sich bewegen?
  - Falls sie sich anfangs bewegen, fliegen sie einfach immer weiter.
  - Falls sie anfangs ruhen, bleiben sie ewig liegen.

Das erste Newtonsche Gesetz

Ein Körper, auf den nichts einwirkt, ändert seinen Bewegungszustand nicht.

Kugeln in der Schwerelosigkeit

- Wir zeigen ihm 3 Kugeln. Diese heißen ***a***, ***b*** und ***c***.
- Wir lassen diese einfach mal los.
- Was wird passieren? Wie werden sie sich bewegen?
  - Falls sie sich anfangs bewegen, fliegen sie einfach immer weiter.
  - Falls sie anfangs ruhen, bleiben sie ewig liegen.

Das erste Newtonsche Gesetz

Ein Körper, auf den nichts einwirkt, ändert seinen Bewegungszustand nicht.

$\Rightarrow$ Um den Bewegungszustand zu ändern, braucht es eine Ursache.

Kugeln in der Schwerelosigkeit

- Wir zeigen ihm 3 Kugeln. Diese heißen ***a***, ***b*** und ***c***.
- Wir lassen diese einfach mal los.
- Was wird passieren? Wie werden sie sich bewegen?
  - Falls sie sich anfangs bewegen, fliegen sie einfach immer weiter.
  - Falls sie anfangs ruhen, bleiben sie ewig liegen.

Das erste Newtonsche Gesetz

Ein Körper, auf den nichts einwirkt, ändert seinen Bewegungszustand nicht.

$\Rightarrow$ Um den Bewegungszustand zu ändern, braucht es eine Ursache.

- Diese Ursache nennen wir Kraft.

Kugeln in der Schwerelosigkeit

- Wir zeigen ihm 3 Kugeln. Diese heißen ***a***, ***b*** und ***c***.
- Wir lassen diese einfach mal los.
- Was wird passieren? Wie werden sie sich bewegen?
  - Falls sie sich anfangs bewegen, fliegen sie einfach immer weiter.
  - Falls sie anfangs ruhen, bleiben sie ewig liegen.

Das erste Newtonsche Gesetz

Ein Körper, auf den nichts einwirkt, ändert seinen Bewegungszustand nicht.

$\Rightarrow$ Um den Bewegungszustand zu ändern, braucht es eine Ursache.

- Diese Ursache nennen wir Kraft.

Definition (Kraft)

Kraft ist die Ursache von Beschleunigung.

Der Begriff der Kraft

- Wir nennen die Ursache der Beschleunigung „Kraft“.

Der Begriff der Kraft

- Wir nennen die Ursache der Beschleunigung „Kraft“.
- Wenn wir eine große Beschleunigung sehen, nennen wir die Kraft groß.

Der Begriff der Kraft

- Wir nennen die Ursache der Beschleunigung „Kraft“.
- Wenn wir eine große Beschleunigung sehen, nennen wir die Kraft groß.
- Wir schreiben also

$$F \sim a \quad \text{Was man auch schreiben kann als}$$
$$F = ma$$

Der Begriff der Kraft

- Wir nennen die Ursache der Beschleunigung „Kraft“.
- Wenn wir eine große Beschleunigung sehen, nennen wir die Kraft groß.
- Wir schreiben also

$$F \sim a \quad \text{Was man auch schreiben kann als}$$
$$F = ma$$

Das zweite Newton’sche Axiom

Kraft ist das Produkt aus Masse und Beschleunigung:

$$\boxed{\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}}$$

Der Begriff der Kraft

- Wir nennen die Ursache der Beschleunigung „Kraft“.
- Wenn wir eine große Beschleunigung sehen, nennen wir die Kraft groß.
- Wir schreiben also

$$F \sim a \quad \text{Was man auch schreiben kann als}$$
$$F = ma$$

Das zweite Newton’sche Axiom

Kraft ist das Produkt aus Masse und Beschleunigung:

$$\boxed{\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}}$$

- Noch ist das eine reine Definition.

Der Begriff der Kraft

- Wir nennen die Ursache der Beschleunigung „Kraft“.
- Wenn wir eine große Beschleunigung sehen, nennen wir die Kraft groß.
- Wir schreiben also

$$F \sim a \quad \text{Was man auch schreiben kann als}$$
$$F = ma$$

Das zweite Newton'sche Axiom

Kraft ist das Produkt aus Masse und Beschleunigung:

$$\boxed{\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}}$$

- Noch ist das eine reine Definition.
- Wir beobachten nur a.

Der Begriff der Kraft

- Wir nennen die Ursache der Beschleunigung „Kraft“.
- Wenn wir eine große Beschleunigung sehen, nennen wir die Kraft groß.
- Wir schreiben also

$$F \sim a \quad \text{Was man auch schreiben kann als}$$
$$F = ma$$

Das zweite Newton’sche Axiom

Kraft ist das Produkt aus Masse und Beschleunigung:

$$\boxed{\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}}$$

- Noch ist das eine reine Definition.
- Wir beobachten nur a.
- Noch wissen wir nicht, was genau F und m sein sollen.

Weltraumbillard: Identische Kugeln

- Auf unserem Raumschiff gibt es ein kleines Äffchen.

Weltraumbillard: Identische Kugeln

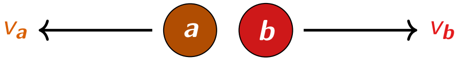
- Auf unserem Raumschiff gibt es ein kleines Äffchen.
- Wir setzen es zwischen **die identischen** Kugeln ***a*** und ***b***:

Weltraumbillard: Identische Kugeln

- Auf unserem Raumschiff gibt es ein kleines Äffchen.
- Wir setzen es zwischen **die identischen** Kugeln ***a*** und ***b***:
- Das Äffchen drückt die Kugeln auseinander.

Weltraumbillard: Identische Kugeln

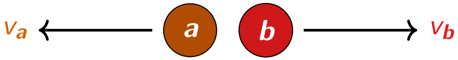
- Auf unserem Raumschiff gibt es ein kleines Äffchen.
- Wir setzen es zwischen **die identischen** Kugeln a und b:
- Das Äffchen drückt die Kugeln auseinander.
- Hinterher sieht es immer so aus:



Und **immer** gilt

Weltraumbillard: Identische Kugeln

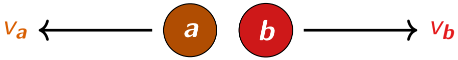
- Auf unserem Raumschiff gibt es ein kleines Äffchen.
- Wir setzen es zwischen **die identischen** Kugeln ***a*** und ***b***:
- Das Äffchen drückt die Kugeln auseinander.
- Hinterher sieht es immer so aus:



Und **immer** gilt $v_a = -v_b$

Weltraumbillard: Identische Kugeln

- Auf unserem Raumschiff gibt es ein kleines Äffchen.
- Wir setzen es zwischen **die identischen** Kugeln ***a*** und ***b***:
- Das Äffchen drückt die Kugeln auseinander.
- Hinterher sieht es immer so aus:

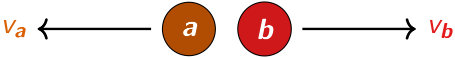


Und **immer** gilt $v_a = -v_b$

- Bewegungsrichtung genau entgegengesetzt

Weltraumbillard: Identische Kugeln

- Auf unserem Raumschiff gibt es ein kleines Äffchen.
- Wir setzen es zwischen **die identischen** Kugeln $\boldsymbol{a}$ und $\boldsymbol{b}$:
- Das Äffchen drückt die Kugeln auseinander.
- Hinterher sieht es immer so aus:

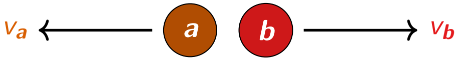


Und **immer** gilt $v_a = -v_b$

  - Bewegungsrichtung genau entgegengesetzt
  - Der Geschwindigkeitsbetrag beider Kugeln ist gleich.

Weltraumbillard: Identische Kugeln

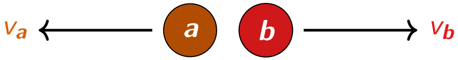
- Auf unserem Raumschiff gibt es ein kleines Äffchen.
- Wir setzen es zwischen **die identischen** Kugeln ***a*** und ***b***:
- Das Äffchen drückt die Kugeln auseinander.
- Hinterher sieht es immer so aus:



  Und **immer** gilt $v_a = -v_b$
  - Bewegungsrichtung genau entgegengesetzt
  - Der Geschwindigkeitsbetrag beider Kugeln ist gleich.
- Die Einwirkung des Äffchens auf die Kugeln ist eine Kraft.

Weltraumbillard: Identische Kugeln

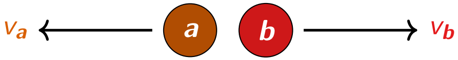
- Auf unserem Raumschiff gibt es ein kleines Äffchen.
- Wir setzen es zwischen **die identischen** Kugeln ***a*** und ***b***:
- Das Äffchen drückt die Kugeln auseinander.
- Hinterher sieht es immer so aus:



  Und **immer** gilt $v_a = -v_b$
  - Bewegungsrichtung genau entgegengesetzt
  - Der Geschwindigkeitsbetrag beider Kugeln ist gleich.
- Die Einwirkung des Äffchens auf die Kugeln ist eine Kraft.
- Wir bezeichnen die Kraft mit der Variablen F.

Weltraumbillard: Identische Kugeln

- Auf unserem Raumschiff gibt es ein kleines Äffchen.
- Wir setzen es zwischen **die identischen** Kugeln a und b:
- Das Äffchen drückt die Kugeln auseinander.
- Hinterher sieht es immer so aus:



  Und **immer** gilt $v_a = -v_b$
  - Bewegungsrichtung genau entgegengesetzt
  - Der Geschwindigkeitsbetrag beider Kugeln ist gleich.
- Die Einwirkung des Äffchens auf die Kugeln ist eine Kraft.
- Wir bezeichnen die Kraft mit der Variablen F.

Das dritte Newtonsche Gesetz

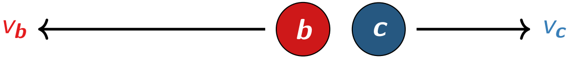
Eine Kraft F ist immer von einer gleich großen entgegengesetzen Kraft $-F$ begleitet.

Ungleiche Kugeln

- Jetzt betrachten wir die Kugeln $\boldsymbol{b}$ und $\boldsymbol{c}$. Sie sind **nicht** identisch.

Ungleiche Kugeln

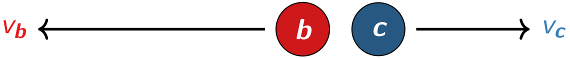
- Jetzt betrachten wir die Kugeln ***b*** und ***c***. Sie sind **nicht** identisch.
- Was Äffchen auch macht, es ergibt sich:



Und immer gilt $v_b = -2v_c$

Ungleiche Kugeln

- Jetzt betrachten wir die Kugeln ***b*** und ***c***. Sie sind **nicht** identisch.
- Was Äffchen auch macht, es ergibt sich:



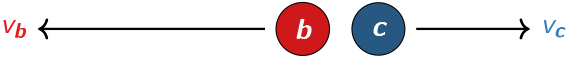
Und immer gilt $v_b = -2v_c$

Das gilt ganz allgemein, die 2 ist Zufall

Andere Kugeln ergeben ein anderes Geschwindigkeitsverhältnis. Aber für ein gegebenes Paar Kugeln ist das Verhältnis immer gleich.

Ungleiche Kugeln

- Jetzt betrachten wir die Kugeln ***b*** und ***c***. Sie sind **nicht** identisch.
- Was Äffchen auch macht, es ergibt sich:



Und immer gilt $v_b = -2v_c$

Das gilt ganz allgemein, die 2 ist Zufall

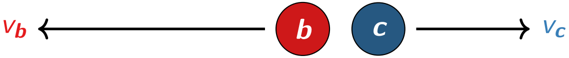
Andere Kugeln ergeben ein anderes Geschwindigkeitsverhältnis. Aber für ein gegebenes Paar Kugeln ist das Verhältnis immer gleich.

- Dasselbe Verhältnis gilt dann auch für die Beschleunigungen:

$$a_b = -2a_c$$

Ungleiche Kugeln

- Jetzt betrachten wir die Kugeln ***b*** und ***c***. Sie sind **nicht** identisch.
- Was Äffchen auch macht, es ergibt sich:



Und immer gilt $v_b = -2v_c$

Das gilt ganz allgemein, die 2 ist Zufall

Andere Kugeln ergeben ein anderes Geschwindigkeitsverhältnis. Aber für ein gegebenes Paar Kugeln ist das Verhältnis immer gleich.

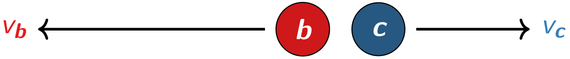
- Dasselbe Verhältnis gilt dann auch für die Beschleunigungen:

$$a_b = -2a_c$$

- Wir wissen aber, dass auf beide Kugeln dieselbe Kraft wirkt.

Ungleiche Kugeln

- Jetzt betrachten wir die Kugeln ***b*** und ***c***. Sie sind **nicht** identisch.
- Was Äffchen auch macht, es ergibt sich:



Und immer gilt $v_b = -2v_c$

Das gilt ganz allgemein, die 2 ist Zufall

Andere Kugeln ergeben ein anderes Geschwindigkeitsverhältnis. Aber für ein gegebenes Paar Kugeln ist das Verhältnis immer gleich.

- Dasselbe Verhältnis gilt dann auch für die Beschleunigungen:

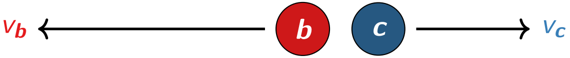
$$a_b = -2a_c$$

- Wir wissen aber, dass auf beide Kugeln dieselbe Kraft wirkt.

$\Rightarrow$ Dieselbe Kraft beschleunigt die Kugeln unterschiedlich.

Ungleiche Kugeln

- Jetzt betrachten wir die Kugeln ***b*** und ***c***. Sie sind **nicht** identisch.
- Was Äffchen auch macht, es ergibt sich:



Und immer gilt $v_b = -2v_c$

Das gilt ganz allgemein, die 2 ist Zufall

Andere Kugeln ergeben ein anderes Geschwindigkeitsverhältnis. Aber für ein gegebenes Paar Kugeln ist das Verhältnis immer gleich.

- Dasselbe Verhältnis gilt dann auch für die Beschleunigungen:

$$a_b = -2a_c$$

- Wir wissen aber, dass auf beide Kugeln dieselbe Kraft wirkt.

$\Rightarrow$ Dieselbe Kraft beschleunigt die Kugeln unterschiedlich.

- Kugel ***c*** setzt der Beschleunigung mehr Widerstand entgegen.

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$a_b = -2a_c \tag{1}$$
$$F_b = -F_c \tag{2}$$
$$F = ma \tag{3}$$

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$a_b = -2a_c \tag{1}$$
$$F_b = -F_c \tag{2}$$
$$F = ma \tag{3}$$

- Wir setzen (3) in (2) ein:

$$F_b = -F_c$$

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$
\begin{aligned}
a_b &= -2a_c & (1)\\
F_b &= -F_c & (2)\\
F &= ma & (3)
\end{aligned}
$$

- Wir setzen (3) in (2) ein:

$$F_b = m_b a_b = \qquad - F_c$$

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$
\begin{aligned}
a_b &= -2a_c && (1)\\
F_b &= -F_c && (2)\\
F &= ma && (3)
\end{aligned}
$$

- Wir setzen (3) in (2) ein:

$$m_b a_b = \qquad\qquad - F_c$$

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$\begin{aligned} a_b &= -2a_c &(1)\\ F_b &= -F_c &(2)\\ F &= ma &(3) \end{aligned}$$

- Wir setzen (3) in (2) ein:

$$m_b a_b = -m_c a_c = -F_c$$

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$
\begin{aligned}
a_b &= -2a_c & (1)\\
F_b &= -F_c & (2)\\
F &= ma & (3)
\end{aligned}
$$

- Wir setzen (3) in (2) ein:

$$m_b a_b = -m_c a_c$$

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$
\begin{aligned}
a_b &= -2a_c \quad (1)\\
F_b &= -F_c \quad (2)\\
F &= ma \quad (3)
\end{aligned}
$$

- Wir setzen (3) in (2) ein:

$$m_b a_b = -m_c a_c$$

- Nun setzen wir wiederum (1) ein:

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$\begin{aligned} a_b &= -2a_c && (1) \\ F_b &= -F_c && (2) \\ F &= ma && (3) \end{aligned}$$

- Wir setzen (3) in (2) ein:

$$m_b a_b = -m_c a_c$$

- Nun setzen wir wiederum (1) ein:

$$m_b(-2a_c) = -m_c a_c$$

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$a_b = -2a_c \quad (1)$$
$$F_b = -F_c \quad (2)$$
$$F = ma \quad (3)$$

- Wir setzen (3) in (2) ein:

$$m_b a_b = -m_c a_c$$

- Nun setzen wir wiederum (1) ein:

$$m_b(\cancel{-}2a_c) = \cancel{-}m_c a_c$$

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$\begin{aligned} a_b &= -2a_c && (1) \\ F_b &= -F_c && (2) \\ F &= ma && (3) \end{aligned}$$

- Wir setzen (3) in (2) ein:

$$m_b a_b = -m_c a_c$$

- Nun setzen wir wiederum (1) ein:

$$m_b(\cancel{-}2\cancel{a_c}) = \cancel{-}m_c\cancel{a_c}$$

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$
\begin{aligned}
a_b &= -2a_c \qquad (1)\\
F_b &= -F_c \qquad (2)\\
F &= ma \qquad (3)
\end{aligned}
$$

- Wir setzen (3) in (2) ein:

$$m_b a_b = -m_c a_c$$

- Nun setzen wir wiederum (1) ein:

$$m_b(\cancel{-}2\cancel{a_c}) = \cancel{-}m_c\cancel{a_c}$$

$$2m_b = m_c$$

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$
\begin{aligned}
a_b &= -2a_c && (1)\\
F_b &= -F_c && (2)\\
F &= ma && (3)
\end{aligned}
$$

- Wir setzen (3) in (2) ein:

$$m_b a_b = -\, m_c a_c$$

- Nun setzen wir wiederum (1) ein:

$$m_b(\cancel{-}2\cancel{a_c}) = \cancel{-}m_c\cancel{a_c}$$

$$2m_b = m_c \Leftrightarrow m_b = \frac{1}{2}m_c$$

Welche Masse haben die Kugeln?

- Wir haben also 3 Gleichungen:

$$a_b = -2a_c \quad (1)$$
$$F_b = -F_c \quad (2)$$
$$F = ma \quad (3)$$

- Wir setzen (3) in (2) ein:

$$m_b a_b = -m_c a_c$$

- Nun setzen wir wiederum (1) ein:

$$m_b(\cancel{-}2\cancel{a_c}) = \cancel{-}m_c\cancel{a_c}$$
$$2m_b = m_c \Leftrightarrow m_b = \frac{1}{2}m_c$$

$\Rightarrow$ Das m von Kugel c ist doppelt so groß.

Deutung der Masse m

- Kugel $\boldsymbol{c}$ hat ein doppelt so großes m.
- Sie setzt der Beschleunigung doppelt so viel Widerstand entgegen.

Deutung der Masse m

- Kugel c hat ein doppelt so großes m.
- Sie setzt der Beschleunigung doppelt so viel Widerstand entgegen.

Deutung der Masse

Deutung der Masse m

- Kugel c hat ein doppelt so großes m.
- Sie setzt der Beschleunigung doppelt so viel Widerstand entgegen.

Deutung der Masse

Masse ist der Widerstand, den ein Körper der Beschleunigung entgegensetzt.

Die Einheiten von Masse und Kraft

- Die Masse der Kugel ***b*** legen wir fest auf $m_b = 1\,\mathrm{kg}$[1].

[1] Und schicken sie nach Paris.

Die Einheiten von Masse und Kraft

- Die Masse der Kugel ***b*** legen wir fest auf $m_b = 1\,\mathrm{kg}$[1].
- Dann hat Kugel ***c*** die Masse $m_c =$.

[1] Und schicken sie nach Paris.

Die Einheiten von Masse und Kraft

- Die Masse der Kugel ***b*** legen wir fest auf $m_b = 1\,\mathrm{kg}$[1].
- Dann hat Kugel ***c*** die Masse $m_c = 2\,\mathrm{kg}$.

[1] Und schicken sie nach Paris.

Die Einheiten von Masse und Kraft

- Die Masse der Kugel ***b*** legen wir fest auf $m_b = 1\,\mathrm{kg}$[1].
- Dann hat Kugel ***c*** die Masse $m_c = 2\,\mathrm{kg}$.
- Das 2. Newton'sche Axiom definiert damit auch die Einheit der Kraft:

$$F = ma$$

$$[F] = \frac{\mathrm{kg\,m}}{\mathrm{s}^2} = \mathrm{N}$$

[1] Und schicken sie nach Paris.

Die Einheiten von Masse und Kraft

- Die Masse der Kugel ***b*** legen wir fest auf $m_b = 1\,\mathrm{kg}$[1].
- Dann hat Kugel ***c*** die Masse $m_c = 2\,\mathrm{kg}$.
- Das 2. Newton'sche Axiom definiert damit auch die Einheit der Kraft:

$$F = ma$$

$$[F] = \frac{\mathrm{kg\,m}}{\mathrm{s}^2} = \mathrm{N}$$

- Diese Einheit nennen wir nach ihrem Erfinder Newton.

[1] Und schicken sie nach Paris.

1. Masse, Beschleunigung und Kraft: Die Newtonschen Gesetze
   - Zielpunkt: Was ist Kraft? Und was ist Masse?
   - Newtons 3 Gesetze
   - Historisches
   - Erdanziehung, Fallbeschleunigung und Masse

Isaac Newton

- Lebenszeit: Um 1700 (1642–1726)
- englischer Universalgelehrter
- Hauptwerk: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*
  - = Mathematische Grundlagen der Naturphilosophie
- Gravitationsgesetz + Bewegungsgesetze = Klassische Mechanik
  - ⇒ Aufgrund von Vorarbeiten von Galileo (1564 – 1642).
- entwickelte die Infinitesimalrechnung
  - ⇒ wohl unabhängig davon auch Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716)
  - Einer der hässlichsten Streitigkeiten der Wissenschaftsgeschichte.

Isaac Newton

- Lebenszeit: Um 1700 (1642–1726)
- englischer Universalgelehrter
- Hauptwerk: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*
  = Mathematische Grundlagen der Naturphilosophie
- Gravitationsgesetz + Bewegungsgesetze = Klassische Mechanik
  ⇒ Aufgrund von Vorarbeiten von Galileo (1564 – 1642).
- entwickelte die Infinitesimalrechnung
  ⇒ wohl unabhängig davon auch Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716)
  - Einer der hässlichsten Streitigkeiten der Wissenschaftsgeschichte.

1. Masse, Beschleunigung und Kraft: Die Newtonschen Gesetze
   - Zielpunkt: Was ist Kraft? Und was ist Masse?
   - Newtons 3 Gesetze
   - Historisches
   - Erdanziehung, Fallbeschleunigung und Masse

Unsere bisherige Definition der Masse

Wir haben die Masse über die Beschleunigung eingeführt.

Unsere bisherige Definition der Masse

Wir haben die Masse über die Beschleunigung eingeführt.

Frage: Was ist Masse?

Wie würden wir beschreiben, was dieses ominöse m in unseren Gleichungen bedeutet?

Unsere bisherige Definition der Masse

Wir haben die Masse über die Beschleunigung eingeführt.

Frage: Was ist Masse?

Wie würden wir beschreiben, was dieses ominöse m in unseren Gleichungen bedeutet?

Antwort

Masse ist der Widerstand, den ein Körper der Beschleunigung entgegensetzt.

Unsere bisherige Definition der Masse

Wir haben die Masse über die Beschleunigung eingeführt.

Frage: Was ist Masse?

Wie würden wir beschreiben, was dieses ominöse m in unseren Gleichungen bedeutet?

Antwort

Masse ist der Widerstand, den ein Körper der Beschleunigung entgegensetzt.

Man spricht auch von der *trägen Masse*.

Eine wohlvertraute Tatsache

- Auf einen Körper im Schwerefeld der Erde wirkt überall die gleiche Kraft.

$\Rightarrow$ Diese Kraft (=Gewichtskraft F_g) ist proportional zu seiner Masse:

$$F_g = m\mathrm{g} \qquad \text{mit } \mathrm{g} = 9{,}81\,\frac{\mathsf{N}}{\mathsf{kg}}$$

Daher im Alltag: **Gewicht** $\approx$ **Masse**

- Wir bekommen eine 2. Definition der Masse!

Eine zweite Definition der Masse

Eben: „Masse $=$ Widerstand gegen Beschleunigung“. Nun:

Eine zweite Definition der Masse

Eben: „Masse = Widerstand gegen Beschleunigung“. Nun:

Frage: Was ist Masse?

Mit Blick darauf, wie wir Masse im Alltag messen, wie würden Sie jetzt Masse definieren?

Eine zweite Definition der Masse

Eben: „Masse = Widerstand gegen Beschleunigung“. Nun:

Frage: Was ist Masse?

Mit Blick darauf, wie wir Masse im Alltag messen, wie würden Sie jetzt Masse definieren?

Antwort

Masse ist das Ausmaß, in dem das Schwerefeld der Erde Kraft auf einen Körper ausübt.

Eine zweite Definition der Masse

Eben: „Masse = Widerstand gegen Beschleunigung“. Nun:

Frage: Was ist Masse?

Mit Blick darauf, wie wir Masse im Alltag messen, wie würden Sie jetzt Masse definieren?

Antwort

Masse ist das Ausmaß, in dem das Schwerefeld der Erde Kraft auf einen Körper ausübt.

Man spricht auch von der *schweren Masse*.

Zwei Messungen derselben Masse

- Im Prinzip müssten die schwere Masse m_s und die träge Masse m_t nicht gleich sein.

Zwei Messungen derselben Masse

- Im Prinzip müssten die schwere Masse m_s und die träge Masse m_t nicht gleich sein.
- Ein Gewicht hängt an einer Federwaage von der Decke.

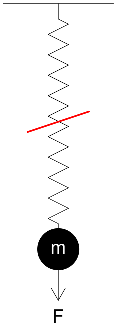


Abbildung: m hängt und fällt.

Zwei Messungen derselben Masse

- Im Prinzip müssten die schwere Masse m_s und die träge Masse m_t nicht gleich sein.
- Ein Gewicht hängt an einer Federwaage von der Decke.

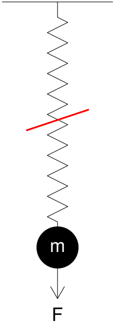


Abbildung: m hängt und fällt.

Messen durch Erdanziehung (wiegen):

$$F = m_s g \qquad \text{(schwere Masse)}$$

Zwei Messungen derselben Masse

- Im Prinzip müssten die schwere Masse m_s und die träge Masse m_t nicht gleich sein.
- Ein Gewicht hängt an einer Federwaage von der Decke.

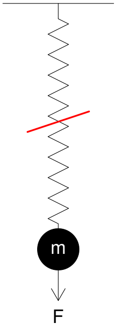


Abbildung: m hängt und fällt.

Messen durch Erdanziehung (wiegen):

$$F = m_s g \qquad \text{(schwere Masse)}$$

Messen durch das 2. Newtonsche Gesetz (beschleunigen):

$$F = m_t a \qquad \text{(träge Masse)}$$

Zwei Messungen derselben Masse

- Im Prinzip müssten die schwere Masse m_s und die träge Masse m_t nicht gleich sein.
- Ein Gewicht hängt an einer Federwaage von der Decke.

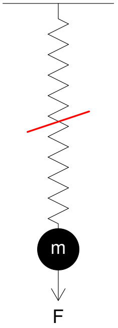


Abbildung: m hängt und fällt.

Messen durch Erdanziehung (wiegen):

$$F = m_s g \qquad \text{(schwere Masse)}$$

Messen durch das 2. Newtonsche Gesetz (beschleunigen):

$$F = m_t a \qquad \text{(träge Masse)}$$

Erst Kraftmessung mit der Federwaage, dann Messen der Beschleunigung durch diese Kraft.

Schwere und träge Masse sind identisch

- wir haben also zwei Gleichungen:

$$F = m_t a \qquad \text{und} \qquad F = m_s g$$

Schwere und träge Masse sind identisch

- wir haben also zwei Gleichungen:

$$F = m_t a \qquad \text{und} \qquad F = m_s g$$

- Man kann nun gleichsetzen (Kraft ist ja identisch, Gewichtskraft):

Schwere und träge Masse sind identisch

- wir haben also zwei Gleichungen:

$$F = m_t a \qquad \text{und} \qquad F = m_s g$$

- Man kann nun gleichsetzen (Kraft ist ja identisch, Gewichtskraft):

$$m_t a = m_s g$$

Schwere und träge Masse sind identisch

- wir haben also zwei Gleichungen:

$$F = m_t a \qquad \text{und} \qquad F = m_s \mathrm{g}$$

- Man kann nun gleichsetzen (Kraft ist ja identisch, Gewichtskraft):

$$m_t a = m_s \mathrm{g}$$

- Wir messen immer, dass die Beschleunigung a **immer** gleich g ist.

$$a = \mathrm{g}$$

Schwere und träge Masse sind identisch

- wir haben also zwei Gleichungen:

$$F = m_t a \qquad \text{und} \qquad F = m_s g$$

- Man kann nun gleichsetzen (Kraft ist ja identisch, Gewichtskraft):

$$m_t a = m_s g$$

- Wir messen immer, dass die Beschleunigung a **immer** gleich g ist.

$$a = g$$

- Wir können die Beschleunigung kürzen:

$$m_t = m_s$$

Schwere und träge Masse sind identisch

- wir haben also zwei Gleichungen:

$$F = m_t a \qquad \text{und} \qquad F = m_s g$$

- Man kann nun gleichsetzen (Kraft ist ja identisch, Gewichtskraft):

$$m_t a = m_s g$$

- Wir messen immer, dass die Beschleunigung a **immer** gleich g ist.

$$a = g$$

- Wir können die Beschleunigung kürzen:

$$m_t = m_s$$

$\Rightarrow$ Schwere und träge Masse sind **immer** identisch. **Die** Masse m.

Schwere und träge Masse sind identisch

- wir haben also zwei Gleichungen:

$$F = m_t a \qquad \text{und} \qquad F = m_s g$$

- Man kann nun gleichsetzen (Kraft ist ja identisch, Gewichtskraft):

$$m_t a = m_s g$$

- Wir messen immer, dass die Beschleunigung a **immer** gleich g ist.

$$a = g$$

- Wir können die Beschleunigung kürzen:

$$m_t = m_s$$

$\Rightarrow$ Schwere und träge Masse sind **immer** identisch. **Die** Masse m.

- Einsteins *allgemeine Relativitätstheorie* vereinigt beide Begriffe.

Folge: Alles fällt gleich schnell

Definition (Das (schwache) Äquivalenzprinzip)

$$a = \mathrm{g}$$

Alle Körper fallen gleich schnell, unabhängig von ihrer Masse.

- Körper mit größerer Masse haben eine größere Gewichtskraft.

$\Rightarrow$ werden heftiger beschleunigt.

- gleichzeitig mehr Widerstand gegen die Beschleunigung.
- Das gleicht sich genau aus.
- Insgesamt ist die Beschleunigung also immer:

$$\mathrm{g} = 9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} = 9{,}81\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}}$$

- Dieses g wird oft angegeben, wenn es um Beschleunigungen geht.

Die „Standardbeschleunigung“

Im Freien Fall beschleunigt ein Körper mit der Beschleunigung g:

Die „Standardbeschleunigung"

Im Freien Fall beschleunigt ein Körper mit der Beschleunigung g:

$$a_{Erde} = \mathrm{g} = 9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \approx 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

Die „Standardbeschleunigung“

Im Freien Fall beschleunigt ein Körper mit der Beschleunigung g:

$$a_{Erde} = \mathrm{g} = 9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \approx 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

Beispiel

Wie schnell ist ein Stein, der aus dem Fenster fällt, nach 1,2,3 Sekunden in $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ bzw $\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$?

Die „Standardbeschleunigung“

Im Freien Fall beschleunigt ein Körper mit der Beschleunigung g:

$$a_{Erde} = \mathrm{g} = 9{,}81\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2} \approx 10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2}$$

Beispiel

Wie schnell ist ein Stein, der aus dem Fenster fällt, nach 1,2,3 Sekunden in $\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$ bzw $\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$?

t	$v/\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	$v/\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$
1 s		

Die „Standardbeschleunigung“

Im Freien Fall beschleunigt ein Körper mit der Beschleunigung g:

$$a_{Erde} = \mathrm{g} = 9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \approx 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

Beispiel

Wie schnell ist ein Stein, der aus dem Fenster fällt, nach 1,2,3 Sekunden in $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ bzw $\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$?

t	$v/\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	$v/\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$
$1\,\mathrm{s}$	$10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}\cancel{\mathrm{s}}}\cdot 1\,\cancel{\mathrm{s}}$	

Die „Standardbeschleunigung“

Im Freien Fall beschleunigt ein Körper mit der Beschleunigung g:

$$a_{Erde} = \mathrm{g} = 9{,}81\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2} \approx 10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2}$$

Beispiel

Wie schnell ist ein Stein, der aus dem Fenster fällt, nach 1,2,3 Sekunden in $\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$ bzw $\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$?

t	$v/\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	$v/\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$
$1\,\mathsf{s}$	$10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}\cancel{\mathsf{s}}}\cdot 1\,\cancel{\mathsf{s}} = 10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	

Die „Standardbeschleunigung“

Im Freien Fall beschleunigt ein Körper mit der Beschleunigung g:

$$a_{Erde} = \mathrm{g} = 9{,}81\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2} \approx 10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2}$$

Beispiel

Wie schnell ist ein Stein, der aus dem Fenster fällt, nach 1,2,3 Sekunden in $\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$ bzw $\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$?

t	$v/\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	$v/\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$
$1\,\mathsf{s}$	$10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}\cancel{\mathsf{s}}} \cdot 1\,\cancel{\mathsf{s}} = 10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	$36\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$

Die „Standardbeschleunigung“

Im Freien Fall beschleunigt ein Körper mit der Beschleunigung g:

$$a_{Erde} = \mathrm{g} = 9{,}81\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2} \approx 10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2}$$

Beispiel

Wie schnell ist ein Stein, der aus dem Fenster fällt, nach 1,2,3 Sekunden in $\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$ bzw $\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$?

t	$v / \frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	$v / \frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$
$1\,\mathsf{s}$	$10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}\cancel{\mathsf{s}}} \cdot 1\,\cancel{\mathsf{s}} = 10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	$36\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$
$2\,\mathsf{s}$		

Die „Standardbeschleunigung“

Im Freien Fall beschleunigt ein Körper mit der Beschleunigung g:

$$a_{Erde} = \mathrm{g} = 9{,}81\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2} \approx 10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2}$$

Beispiel

Wie schnell ist ein Stein, der aus dem Fenster fällt, nach 1,2,3 Sekunden in $\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$ bzw $\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$?

t	$v/\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	$v/\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$
1 s	$10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}\,\cancel{\mathsf{s}}} \cdot 1\,\cancel{\mathsf{s}} = 10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	$36\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$
2 s	$10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}\,\cancel{\mathsf{s}}} \cdot 2\,\cancel{\mathsf{s}} = 20\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	$72\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$

Die „Standardbeschleunigung“

Im Freien Fall beschleunigt ein Körper mit der Beschleunigung g:

$$a_{Erde} = \mathrm{g} = 9{,}81\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2} \approx 10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2}$$

Beispiel

Wie schnell ist ein Stein, der aus dem Fenster fällt, nach 1,2,3 Sekunden in $\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$ bzw $\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$?

t	$v/\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	$v/\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$
1 s	$10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}\cancel{\mathsf{s}}} \cdot 1\,\cancel{\mathsf{s}} = 10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	$36\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$
2 s	$10\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}\cancel{\mathsf{s}}} \cdot 2\cancel{\mathsf{s}} = 20\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}$	$72\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$
3 s		

Die „Standardbeschleunigung“

Im Freien Fall beschleunigt ein Körper mit der Beschleunigung g:

$$a_{Erde} = \mathrm{g} = 9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \approx 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

Beispiel

Wie schnell ist ein Stein, der aus dem Fenster fällt, nach 1,2,3 Sekunden in $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ bzw $\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$?

t	$v/\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	$v/\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$
1 s	$10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}\cancel{\mathrm{s}}} \cdot 1\,\cancel{\mathrm{s}} = 10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	$36\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$
2 s	$10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}\cancel{\mathrm{s}}} \cdot 2\cancel{\mathrm{s}} = 20\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	$72\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$
3 s	$10\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}\cancel{\mathrm{s}}} \cdot 3\cancel{\mathrm{s}} = 30\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	$108\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$

Ein Beispiel

Beispiel (Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster)

Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster. Nach welcher Zeit ist er $100\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$ schnell?

$$a =$$

Ein Beispiel

Beispiel (Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster)

Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster. Nach welcher Zeit ist er $100\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$ schnell?

$$a = \mathrm{g} =$$

Ein Beispiel

Beispiel (Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster)

Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster. Nach welcher Zeit ist er $100\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$ schnell?

$$a = \mathrm{g} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Ein Beispiel

Beispiel (Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster)

Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster. Nach welcher Zeit ist er $100\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$ schnell?

$$a = \mathrm{g} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow \Delta t =$$

Ein Beispiel

Beispiel (Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster)

Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster. Nach welcher Zeit ist er $100\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$ schnell?

$$a = \mathrm{g} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta v}{\mathrm{g}} = \frac{100\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}}{9{,}81\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2}} = \frac{100\,\frac{1}{3{,}6}\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}}{9{,}81\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2}}$$

Ein Beispiel

Beispiel (Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster)

Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster. Nach welcher Zeit ist er $100\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}$ schnell?

$$
\begin{aligned}
a = \mathrm{g} &= \frac{\Delta v}{\Delta t} \\
\Rightarrow \Delta t &= \frac{\Delta v}{\mathrm{g}} = \frac{100\,\frac{\mathsf{km}}{\mathsf{h}}}{9{,}81\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2}} = \frac{100\,\frac{1}{3{,}6}\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}}{9{,}81\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2}} \\
&= \frac{27{,}8\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}}}{9{,}81\,\frac{\mathsf{m}}{\mathsf{s}^2}} = 2{,}8\,\mathsf{s}
\end{aligned}
$$

Ein Beispiel

Beispiel (Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster)

Ein Blumentopf fällt aus dem Fenster. Nach welcher Zeit ist er $100\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$ schnell?

$$a = \mathrm{g} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta v}{\mathrm{g}} = \frac{100\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}}{9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}} = \frac{100\,\frac{1}{3{,}6}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}}$$

$$= \frac{27{,}8\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}} = 2{,}8\,\mathrm{s}$$

Ein Porsche Carrera braucht das Doppelte, beschleunigt also mit etwa $0{,}5\,\mathrm{g}$.