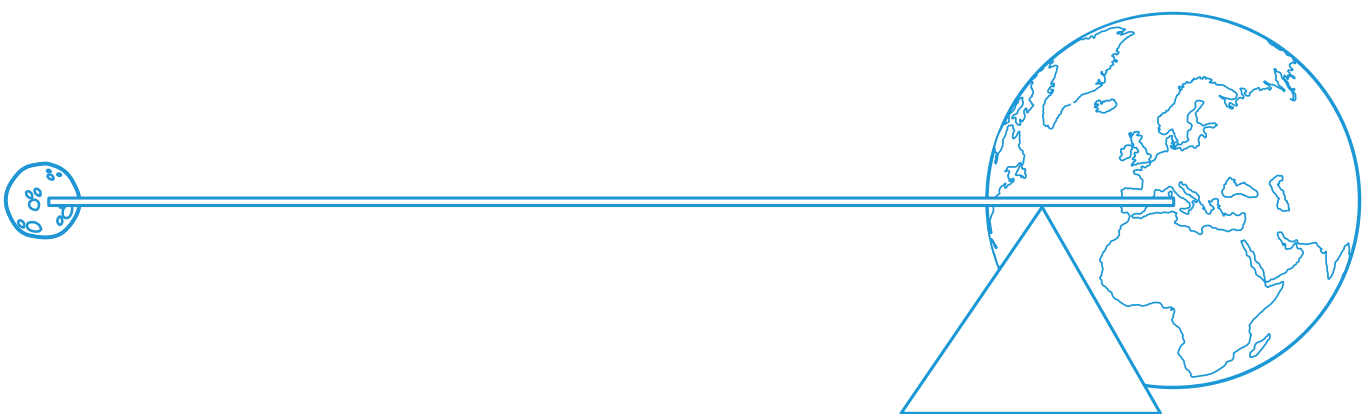


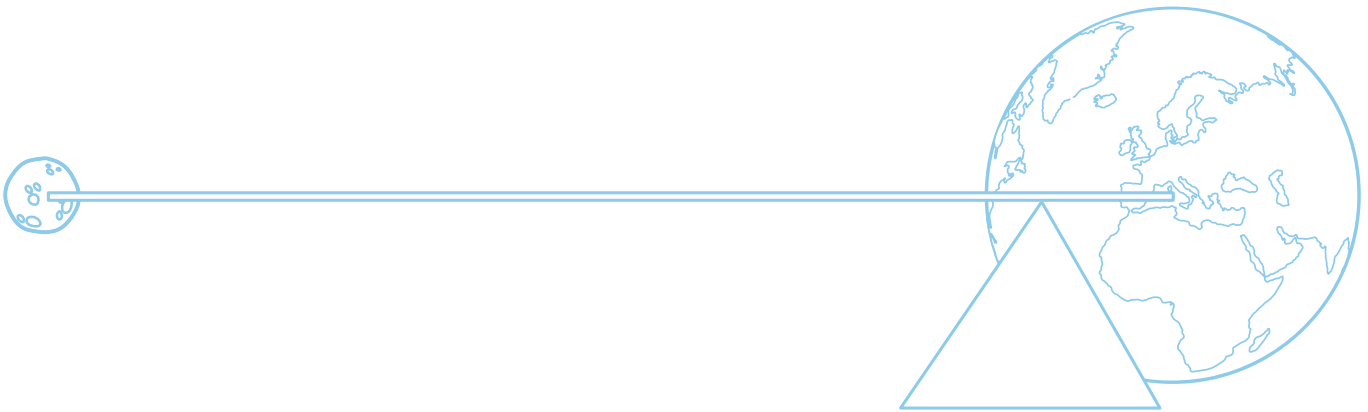
physics | P07

# teach with space

## → BARYZENTRISCHE BÄLLE

Umlaufbahnen und der Massenmittelpunkt





**Die wichtigsten Fakten**

**Seite 3**

**Aufgabe – Baryzentrische Bälle**

**Seite 4**

Diskussion

Seite 7

Schlussfolgerung

Seite 8

**Arbeitsblätter für Schüler**

**Seite 9**

**Anhang**

**Seite 11**

Vorbereitung der zwei Paar Tennisbälle

Seite 11

Angeleitete Diskussion

Seite 13

Glossar

Seite 18

Antworten zu dem Arbeitsblatt

Seite 19

Links

Seite 24

# → BARYZENTRISCHE BÄLLE

## Umlaufbahnen und der Massenmittelpunkt

### DIE WICHTIGSTEN FAKTEN

**Altersgruppe:** 14 - 18 Jahre

**Art:** Demonstration durch den Lehrer

**Schwierigkeitsgrad:** leicht

**Vorbereitungszeit für den Lehrer:** 1 Stunde für die Vorbereitung des Versuchsmaterials

**Zeitbedarf für den Unterricht:** 10 bis 30 Minuten

**Kosten je Kit:** mittel (5-25 Euro)

**Ort:** draußen oder großer Innenraum (d.h. Schulhalle/Turnhalle)

**Einschließlich der Verwendung von:** Tennisbällen, Kugellagern

### Verbindungen zum Lehrplan

#### Physik

- Momentensatz / Drehmomente
- Massenmittelpunkt
- Planeten- / Satelliten-Umlaufbahnen
- Doppler-effekt
- Rotationsmechanik

#### Mathematik

- Momentensatz / Drehmomente
- Massenmittelpunkt
- Rotationsmechanik

#### Astronomie

- Planeten- / Satelliten-Umlaufbahnen
- Doppler-effekt
- Doppelsterne
- Entdeckung von Exoplaneten

### Kurzfassung

Bei dieser Aufgabe wird das Prinzip der Momente (Momentensatz) auf rotierende Systeme angewandt, um das Konzept eines Baryzentrums bzw. Massenmittelpunkts zu demonstrieren, und um zu zeigen, wie sich Objekte im Orbit umeinander bewegen. Danach konsolidieren die Schüler dieses Konzept durch Berechnung des Massenmittelpunkts in verschiedenen astronomischen Zusammenhängen.

### Die Schüler sollten bereits kennen

1. Das Konzept des Momentensatzes / Drehmomente;
2. das Konzept des auf das elektromagnetische Spektrum angewandten Doppler-effekts.

### Lernergebnisse

1. Die Schüler erfahren etwas über den Massenmittelpunkt und erkennen, dass für ein schwerkraftgebundenes System mit zwei oder mehr Körpern alle Objekte um einen gemeinsamen Massenmittelpunkt kreisen.
2. Die Schüler lernen, wie sie den Momentensatz anwenden sollen, um den Massenmittelpunkt eines Zweikörpersystems zu berechnen.
3. Die Schüler wenden die physikalischen Konzepte auf mehrere astronomische Situationen an und erfahren dabei etwas über Doppelstern-Systeme, Planet-Mond-Systeme und extrasolare Planeten.

### Sie benötigen auch



↑ Video über baryzentrische Bälle (VP07a).

Video über baryzentrische Bälle im Weltraum (VP07b). Siehe unter Links S.24.

## Baryzentrische Bälle

Beim Beobachten der Umlaufbahnen von Planeten um die Sonne, von Monden, die ihren Mutterplaneten, oder von Raumsonden, die die Erde oder einen anderen Himmelskörper umkreisen, könnte es verlockend sein anzunehmen, dass sich ein Objekt (das Objekt mit der geringsten Masse) bewegt, während das andere stillsteht. Nach Newtons Drittem Gesetz jedoch gilt:

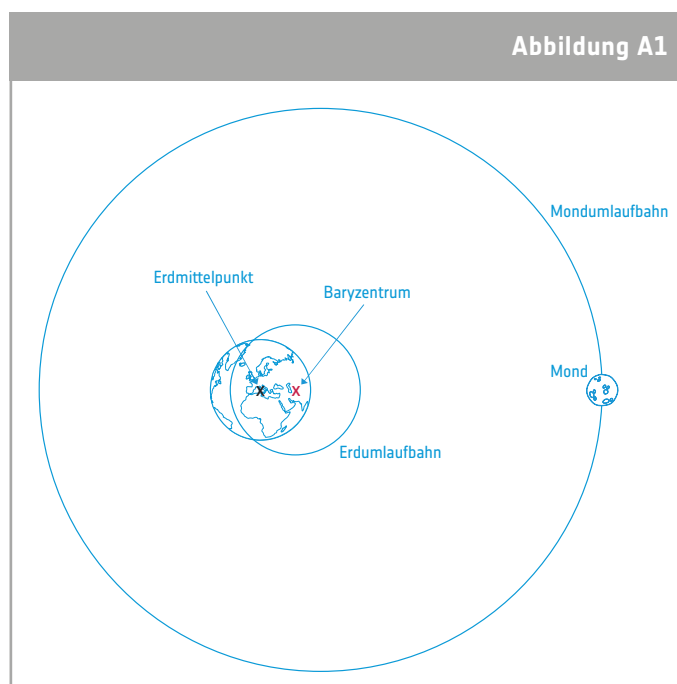
*Übt ein Körper A eine Kraft auf einen Körper B aus, so wirkt eine gleich große aber entgegengerichtete Kraft von Körper B auf Körper A.*

was oft so beschrieben wird: „Jede Aktion hat eine gleich große und entgegengerichtete Reaktion“. Daraus folgt, dass beide Objekte dieselbe Anziehungskraft aufeinander ausüben, und deren beide Bahnen werden durch diese Gravitationskraft beeinflusst.

Wenn wir somit ein System aus zwei Körpern, beispielsweise Erde und Mond, betrachten, dann umkreist nicht der Mond die Erde, sondern sowohl die Erde als auch der Mond umkreisen einen gemeinsamen Punkt im Weltraum. Der Punkt, um den sie beide kreisen, der gemeinsame **Massenmittelpunkt\*** des Systems, heißt **Baryzentrum\***.

Wenn ein Objekt mehr Masse als das andere aufweist, wie es bei der Erde und dem Mond (bzw. einem künstlichen Satelliten, der die Erde umkreist) der Fall ist, ist die Orbitalbewegung des Objekts mit der größeren Masse (Erde) vielleicht nicht so klar erkennbar. Dies liegt daran, dass das Baryzentrum bzw. der Massenmittelpunkt viel näher beim Erdmittelpunkt liegt als der Mittelpunkt des Mondes bzw. Satelliten. Abbildung A1 zeigt eine Darstellung des Erde-Mond-Systems.

Dasselbe gilt für das Sonnensystem als Ganzes. Die Sonne enthält ungefähr 99,85 % der Masse des Sonnensystems. Das Baryzentrum des Sonnensystems liegt deshalb nahe beim Mittelpunkt der Sonne, so dass sich die Umlaufbahn der Sonne um das Baryzentrum nur mit hochpräzisen Beobachtungen erkennen lässt.



↑ Ein schematisches Diagramm des Erde-Mond-Systems (nicht maßstäblich), das die Position des Baryzentrums und die Umlaufbahnen der Erde und des Mondes um diesen Punkt hervorhebt. Das Baryzentrum liegt etwa 4.650 km vom Erdmittelpunkt entfernt – der Erdradius beträgt knapp 6.400 km. Das Baryzentrum liegt ungefähr 80-mal weiter vom Mittelpunkt des Mondes als vom Erdmittelpunkt entfernt.

\* **Baryzentrum:** der Massenmittelpunkt eines Systems.

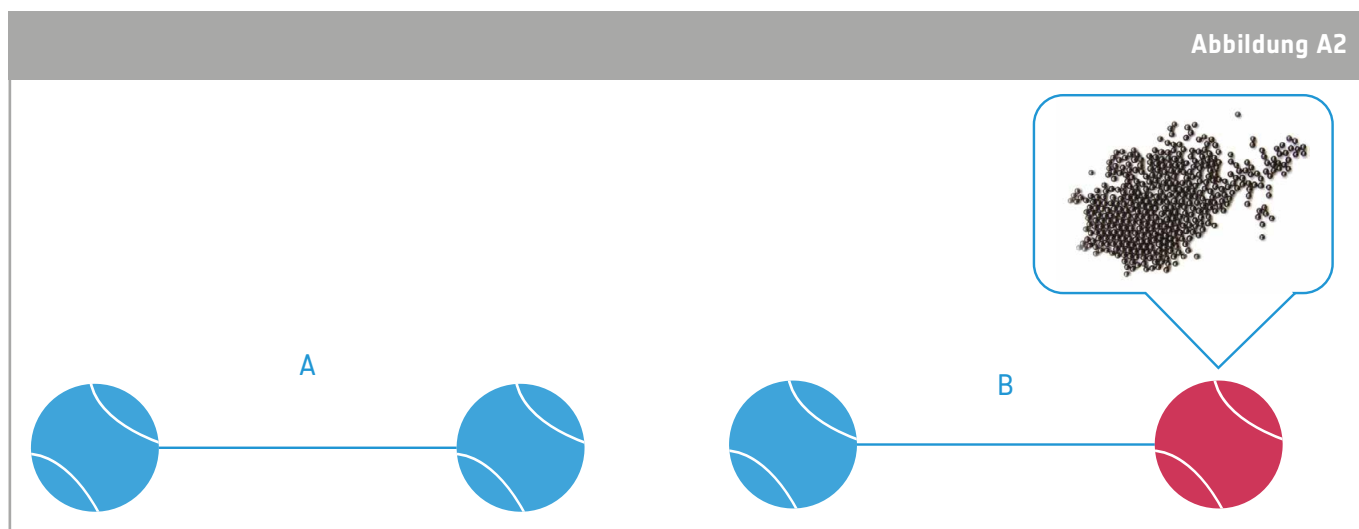
**Massenmittelpunkt:** der einzige Punkt in einem Objekt oder System, an dem die Gewichtskomponenten für jeden Punkt die Resultierende Null annehmen. Ein Objekt befindet sich im Gleichgewicht, wenn es an einem Punkt an diesem Ort aufgehängt wird.

Bei dieser Demonstration wird anhand von zwei im Voraus zusammengesetzten Paar Tennisbällen gezeigt, wie sich die Position des Baryzenters eines Zweikörper-Systems mit der Masse der beiden Körper ändert. Die Bälle des ersten Pairs haben dieselbe Masse. Bei dem zweiten Paar wird einer der Tennisbälle mit Münzen oder Kugellagern gefüllt, um seine Masse zu erhöhen.

## Versuchsmaterial

Anweisungen zur Vorbereitung der Tennisbälle finden sich im Anhang.

- Paar Tennisbälle gleicher Masse, mit einer Schnur verbunden
- Paar Tennisbälle unterschiedlicher Masse, mit einer Schnur verbunden



↑ A) Paar Tennisbälle gleicher Masse (leer).

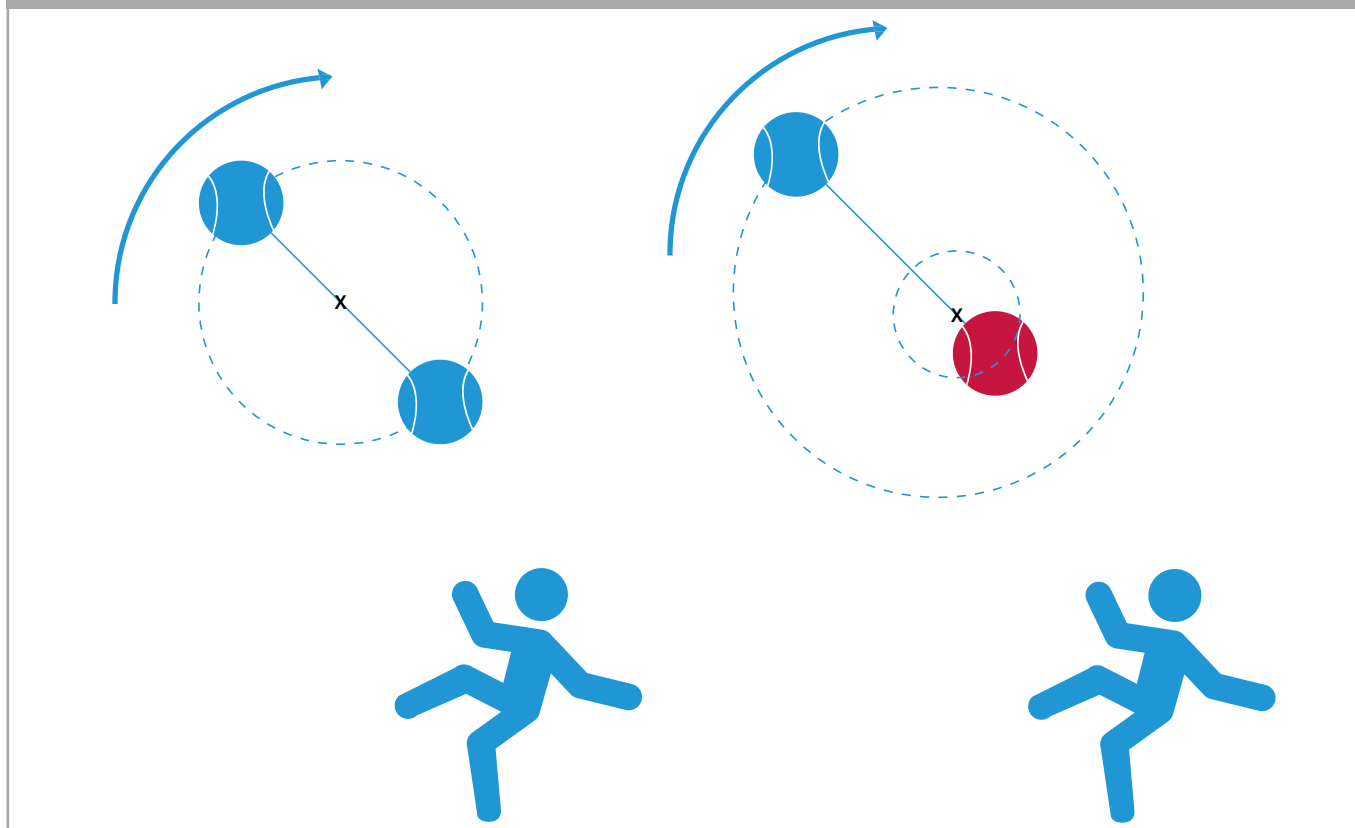
B) Paar Tennisbälle unterschiedlicher Masse: Einer der Tennisbälle wurde mit Kugellagern, Bleikügelchen oder Münzen gefüllt und wird gefärbt, um ihn als den Ball mit der höheren Masse zu erkennen.

## Anweisungen

Bitte beachten Sie das Begleitvideo: Teach with space – Baryzentrische Bälle | VPO7a.

1. Halten Sie das Paar Tennisbälle gleicher Masse so, dass ein Ball unter dem anderen hängt.
2. Schwingen Sie einige Male, um einen Impuls zu erzeugen, und lassen Sie dann den gehaltenen Ball los.
3. Bei der Bewegung der Bälle auf ihrer Bahn rotieren sie beide um den Massenmittelpunkt des Systems. Im Fall der Bälle gleicher Masse ist dies der Mittelpunkt der Schnur (Abbildung A3).
4. Wiederholen Sie den Vorgang mit dem Paar Bälle unterschiedlicher Masse. Je nach persönlicher Vorliebe kann der Vorführende den schwereren oder den leichteren Ball halten. Wenn die Bälle unterschiedlicher Masse losgelassen werden, wird der schwerere Ball eindeutig eine kleine Umlaufbahn um den Massenmittelpunkt (d.h. nahe dem schweren Ball) einnehmen, während der leichtere Ball eine viel größere Umlaufbahn beschreibt (Abbildung A3). Je größer der Massenunterschied, desto näher am Baryzentrum befindet sich der schwerere Tennisball.

Abbildung A3



↑ Links: Für das Paar Tennisbälle gleicher Masse befindet sich der mit X gekennzeichnete Massenmittelpunkt bzw. das Baryzentrum im Mittelpunkt des Systems in der Mitte der Schnurlänge. Beide Tennisbälle beschreiben dieselbe Umlaufbahn (punktirierte Linie).

Rechts: Für das Paar Tennisbälle unterschiedlicher Masse befindet sich der mit X gekennzeichnete Massenmittelpunkt bzw. das Baryzentrum viel näher bei dem (rot gefärbten) gefüllten Ball mit größerer Masse. Dies wird beobachtet, da der Ball mit größerer Masse eine viel kleinere Umlaufbahn bzw. Kreis einnimmt, während der leichtere Ball eine viel größere Umlaufbahn bzw. Kreis einnimmt.

## Sicherheit und Gesundheitsschutz

- Diese Demonstration sollte draußen oder in einem großen Innenraum wie Schul- oder Turnhalle erfolgen.
- Die Schüler sollten Abstand halten.
- Der Vorführende sollte das Werfen der Bälle üben, bevor er es vor der Klasse demonstriert.
- Prüfen Sie vor jeder Demonstration sorgfältig, dass alle Knoten sicher sind und das Loch zum Füllen des Balls mit größerer Masse richtig verschlossen ist.

## Diskussion

Erörtern Sie nach der Durchführung der Demonstration mit den Schülern, was sie beobachtet haben. Einige Vorschläge für Diskussionsfragen sind unten aufgeführt.

Eine angeleitete Diskussion anhand dieser Fragen mit Bezug auf den Weltraum finden Sie im Anhang. Ein Arbeitsblatt für Schüler mit Berechnungen im Kontext des Weltraums ist ebenfalls vorhanden und kann bei Bedarf benutzt werden.

Das Ziel der Diskussion besteht darin, dass die Schüler die nachstehenden Schlüsselpunkte begreifen:

- In einem System mit zwei oder mehr Objekten gibt es ein gemeinsames Baryzentrum bzw. Massenmittelpunkt, um das/den alle Objekte kreisen.
- Der Ort des Baryzentrums richtet sich nach den Massen der Objekte. Für zwei Objekte gleicher Masse liegt das Baryzentrum im geometrischen Mittelpunkt des Systems. Bei ungleichen Massen liegt das Baryzentrum näher beim Massenmittelpunkt des Objekts mit der größeren Masse.
- Für ein einfaches Beispiel mit zwei Körpern sollten die Schüler in der Lage sein, den Momentensatz anzuwenden, um den Ort des Baryzentrums zu berechnen.
- Das Verständnis der Baryzentren ist für den Kontext des Weltraums wichtig - von der Anwendung des Baryzentrum-Prinzips zur Entdeckung ansonsten unsichtbarer Planeten, die um andere Sterne kreisen, bis hin zur Klassifizierung von Himmelskörpern in unserem Sonnensystem zur Unterscheidung zwischen Planeten mit Monden oder Zweiplaneten Systemen.

### Vorschläge für Fragen:

- Wie lässt sich das Baryzentrum eines Systems finden?
- Wie finden Astronomen die Baryzentren entfernter Orbitalsysteme im Weltraum, wie Doppelstern-Systeme oder Planeten, die andere Sterne umkreisen?
- Wie wird das Baryzentrum-Konzept genutzt, um den Unterschied zwischen einem Planeten mit einem natürlichen Satelliten (Mond) und zwei Planeten in einer gegenseitigen Umlaufbahn um ein Baryzentrum (ein Doppelplaneten-System) zu erklären?
- Ist Pluto tatsächlich Teil eines „Doppel-Zwergplaneten-Systems“?
- Was passiert bei Doppelstern-Systemen, wenn zwei Objekte sehr großer Masse einander eng umkreisen?

## → SCHLUSSFOLGERUNG

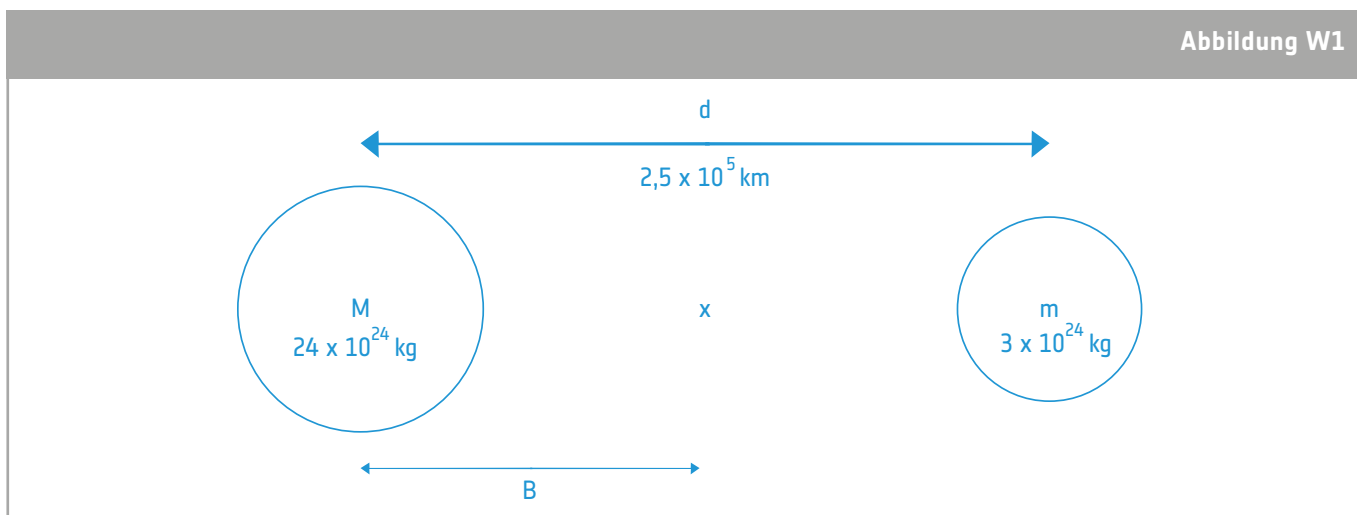
Bei dieser Aufgabe werden durch eine einfache, jedoch wirkungsvolle Demonstration zwei Schlüsselkonzepte der Physik und Mechanik erforscht – das Baryzentrum bzw. der Massenmittelpunkt und das Prinzip der Momente (Momentensatz). Diese Konzepte werden in den Kontext von Umlaufbahnen im Weltraum, Monden, Doppelplaneten und Sternen gesetzt, um die Fantasie der Schüler anzuregen.



## Baryzentren im Weltraum

### Fragen

1. Findet für die in Abbildung W1 gezeigten Objekte den Abstand des Baryentrums vom Mittelpunkt des Objekts M und danach vom Mittelpunkt des Objekts m.



2. a) Der Mond hat eine Masse von 0,0123 ME (wobei ME die Masse der Erde ist), und der Abstand vom Erdmittelpunkt zum Mittelpunkt des Mondes beträgt 384.000 km. Wenn der Radius der Erde  $6,37 \times 10^3 \text{ km}$  beträgt, zeigt, dass Erde und Mond ein Planeten-Mond-System bilden.  
 b) Einige Daten für Pluto und dessen größtem Mond Charon aus den Informationsblättern der NASA zu Monden und Planeten sind nachstehend aufgeführt:

Masse von Pluto	$1,31 \times 10^{22} \text{ kg}$
Radius von Pluto	1.195 km
Masse von Charon	$1,62 \times 10^{21} \text{ kg}$
Abstand der Mittelpunkte	19.600 km

Zeigt, ob Pluto und Charon ein Planeten-Mond- oder ein Doppelplaneten-System sind.

3. Die Sonne hat einen Durchmesser von 1,4 Mio. km, und Jupiter hat einen Radius von 140.000 km. Der mittlere Abstand Sonne - Jupiter beträgt 778 Mio. km. Die Masse der Sonne macht etwa das 1000-Fache der Masse von Jupiter aus. Berechnet die Position des Baryentrums des Sonne-Jupiter-Systems und äußert euch zu dessen Ort.

4. Im Video Teach with space – Baryzentrische Bälle im Weltraum | VPO7b demonstriert die ESA-Astronautin Samantha Cristoforetti das baryzentrische Prinzip bei der Mikrogravitation an Bord der Internationalen Raumstation (ISS).

Beim ersten Szenario verbindet Samantha zwei Baseball-Bälle mit einer Stricknadel. Die beiden Bälle haben die gleiche Masse, und deshalb liegt das Baryzentrum im geometrischen Mittelpunkt des Systems, dem Mittelpunkt der Stricknadel. Wenn Samantha auf einen der Bälle eine Kraft ausübt, rotiert das System um das Baryzentrum. Wenn Samantha diese Kraft zum zweiten Mal ausübt, diesmal auf die Position des Baryzentrums, verlagert (bewegt) sich das gesamte System durch den Raum, rotiert jedoch nicht.

Beim zweiten Szenario ersetzt Samantha einen der Baseball-Bälle durch einen anderen Ball gleicher Größe, jedoch unterschiedlicher Masse. Wenn Samantha eine Kraft auf den neuen Ball ausübt, rotiert das System um das Baryzentrum, das sich nicht mehr im geometrischen Mittelpunkt des Systems befindet. Wenn Samantha eine Kraft auf den Ort des Baryzentrums ausübt, rotiert das System wie zuvor nicht mehr, sondern verlagert sich nur.

Angenommen, die Masse eines Baseball-Balls betrage  $0,145 \text{ kg}$ , die Länge der Stricknadel  $0,3 \text{ m}$  und der Ort des Baryzentrums befinde sich auf einem Viertel des Abstands zwischen dem Mittelpunkt des Baseball-Balls und dem Mittelpunkt des anderen Balls, wieviel beträgt dann die Masse des zweiten Balls? Welches Objekt hat die größere Masse?

## → ANHANG

### Vorbereitung der zwei Paar Tennisbälle

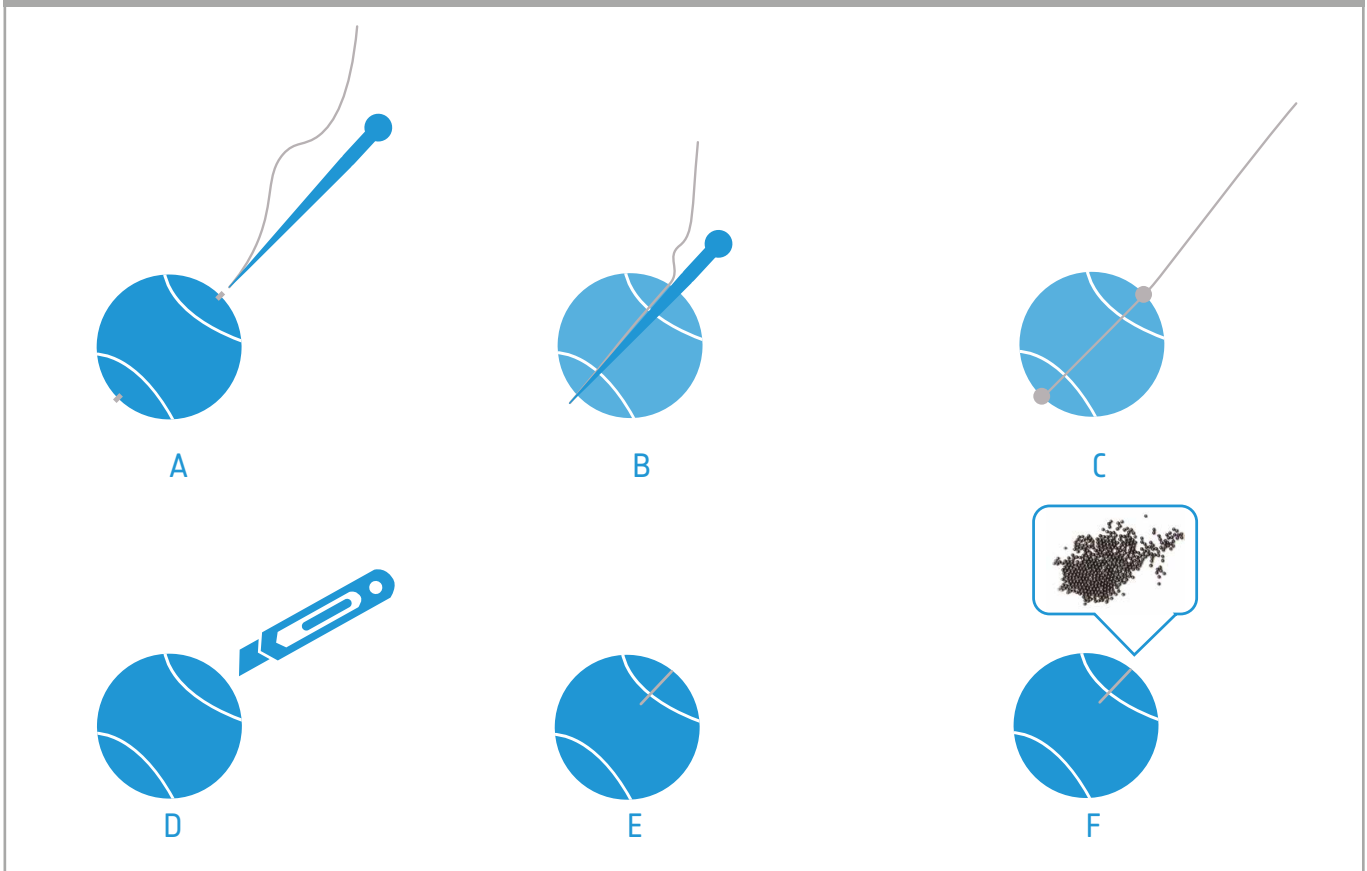
In beiden Fällen werden zwei Tennisbälle mit einer starken Schnur miteinander verbunden. Die Bälle des ersten Pairs haben die gleiche Masse. Bei dem zweiten Paar Tennisbälle ist ein Ball mit Kugellager oder Münzen gefüllt, um ein Paar von Objekten mit ungleicher Masse herzustellen.

### Versuchsmaterial

- 4 Tennisbälle
- starke Schnur
- Schere
- Marker
- Stricknadel (oder Schraubendreher)
- Kugellager/Bleikügelchen/kleine Münzen – ausreichend zum Füllen eines Tennisballs
- starker Klebstoff oder starkes Klebeband
- Klebeband
- Bastelmesser

### Anweisungen

1. Schneidet eine Schnur von ungefähr 60 cm Länge ab.
2. Befestigt ein Ende der Schnur mit Klebeband an der Stricknadel.
3. Drückt die Stricknadel in den Tennisball, so dass ein kleines Loch entsteht. Die Spitze der Stricknadel sollte auf der gegenüberliegenden Seite des Balls heraustreten, so dass ein weiteres Loch entsteht – am einfachsten ist es, zur Orientierung zwei Punkte außen an dem Tennisball anzuzeichnen. Sobald die Spitze der Stricknadel auf der gegenüberliegenden Seite aus dem Ball austritt, entfernt das Klebeband und bindet einen doppelten Knoten zur Sicherung der Schnur (siehe Abbildung AX1 A-B).
4. Zieht die Stricknadel durch das ursprüngliche Loch zurück und bindet einen zweiten doppelten Knoten in die Schnur. Die Schnur läuft jetzt sicher durch den Ball und ist durch Knoten auf beiden Seiten gesichert. Falls erforderlich, verstärkt die Löcher mit Klebstoff oder starkem Klebeband (siehe Abbildung AX1 C).
5. Wiederholt die Schritte 1-4 mit einem zweiten Tennisball und dem entgegengesetzten Ende der Schnurlänge. Zwischen den beiden Tennisbällen sollten ungefähr 40 – 50 cm Schnur liegen.
6. Wiederholt die Schritte 1-5 bei dem zweiten Paar Tennisbälle. Achtet darauf, dass die Schnurlänge zwischen den Tennisbällen bei beiden Paaren ungefähr gleich lang ist.
7. Wählt ein Paar Tennisbälle. Schneidet mit einem Bastelmesser einen kleinen Schlitz in einen der Bälle. Füllt Kugellager/Bleikügelchen /kleine Münzen ein, bis der Ball voll ist. Verschließt den Schlitz wieder mit Klebstoff oder starkem Klebeband. (siehe Abbildung AX1 D-F)
8. Färbt bzw. markiert den gefüllten Tennisball mit dem Marker.



↑ Zusammenstellung der zwei Paar Tennisbälle.

## Angeleitete Diskussion

### Wie findet man das Baryzentrum eines Systems?

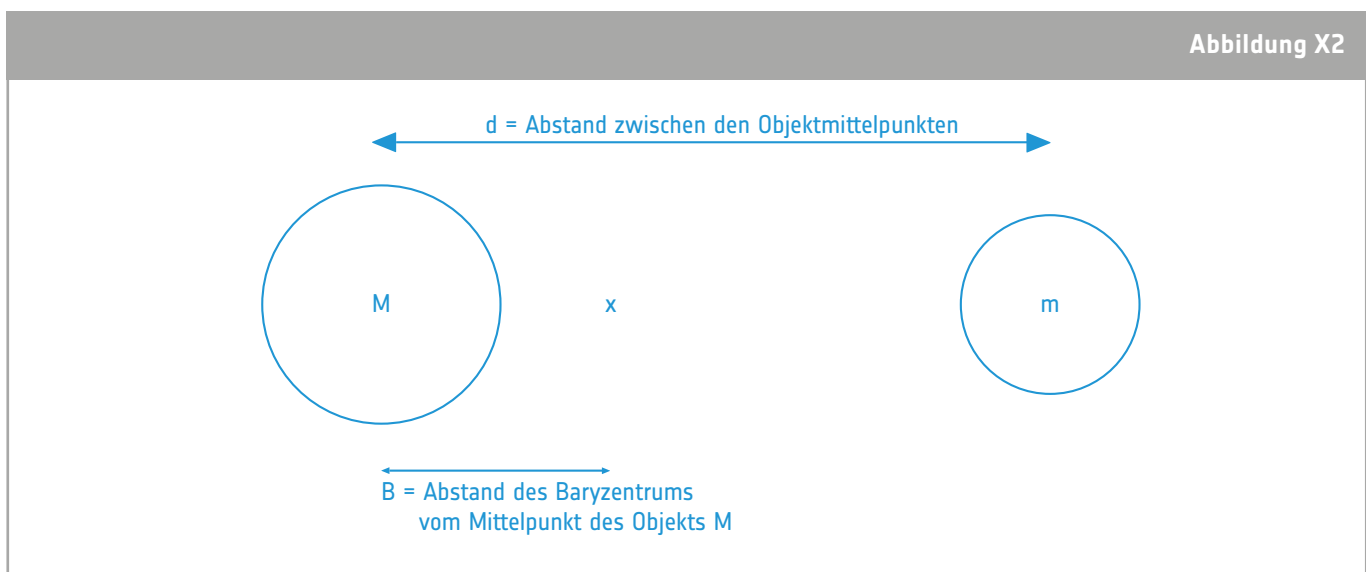
Für jedes System im Weltraum, bei dem zwei oder mehr Objekte umeinander kreisen, hat das System einen Massenmittelpunkt bzw. Baryzentrum, um den alle Körper kreisen.

#### Einfacher Fall: ein Zweikörper-System

Für den einfachen Fall eines Zweikörper-Systems ist der Massenmittelpunkt bzw. das Baryzentrum der Punkt, um den beide Objekte kreisen. Das Baryzentrum kann man sich als den „Gleichgewichtspunkt“ des Systems vorstellen.

Wenn die Massen zweier Objekte und der Abstand zwischen ihnen bekannt sind, lässt sich anhand des Prinzips der **Momente\*** (**Momentensatz**) die Position des Baryzentrums berechnen. Stellen wir uns zunächst das System bildlich als um einen Drehpunkt balancierend vor, wie zwei Leute, die auf einer Wippschaukel sitzen. Befände sich der Drehpunkt im Baryzentrum, dann würden sich die Momente auf jeder Seite gegenseitig aufheben, wenn das System in ein imaginäres externes Gravitationsfeld verlagert würde.

Betrachtet das System der zwei Objekte wie in Abbildung X2 gezeigt. Die Objekte haben eine Masse  $M$  bzw.  $m$ , und ihre Mittelpunkte befinden sich im Abstand  $d$ . Das Baryzentrum liegt zwischen den Objekten. Der Abstand zwischen dem Mittelpunkt des Objekts mit der größten Masse und dem Baryzentrum beträgt  $B$ .



↑ Zwei Objekte (Masse  $M$  und  $m$ ) in Umlaufbahn um einen gemeinsamen Massenmittelpunkt bzw. Baryzentrum. Die Objekte befinden sich im Abstand  $d$ , und der Abstand zwischen dem Mittelpunkt des Objekts  $M$  mit der größten Masse und dem Baryzentrum beträgt  $B$ .

Wird der Momentensatz um den Massenmittelpunkt (das Baryzentrum) angewandt, dann erhält man:

$$\text{Summe der rechtsdrehenden Momente um das Baryzentrum} = \text{Summe der linksdrehenden Momente um das Baryzentrum}$$

d.h. die Momente heben einander auf. Deshalb gilt für das System in Abbildung X2:

\* **Moment:** eine Tendenz zur Erzeugung von Bewegung, insbesondere einer Rotation um einen Punkt oder eine Achse.

$B$  = Abstand vom Baryzentrum zum Mittelpunkt des Objekts mit Masse  $M$  (in m)

$d$  = Abstand zwischen den Massenmittelpunkten der beiden Objekte (in m)

$m$  = Masse des kleineren Objekts (in kg)

$M$  = Masse des größeren Objekts (in kg)

Somit gilt:  $M \times B = m \times (d - B)$

$$MB = md - mB$$

$$MB + mB = md$$

$$B \times (M + m) = md$$

Daraus ergibt sich der Abstand zum Baryzentrum vom Mittelpunkt des Objekts mit der Masse  $M$  als:

$$B = md/(M+m)$$

## Wie finden Astronomen die Baryzentren entfernter Orbitalsysteme im Weltraum wie Doppelstern-Systeme oder Planeten, die andere Sterne umkreisen?

In astronomischen Maßstäben ist die Bewegung der Sterne bei einem **Doppelstern**\*-System um ihr Baryzentrum nur schwer zu entdecken. Zwar kann der physische Abstand zwischen den Sternen viele Millionen Kilometer betragen, doch die Bewegung der Sterne am Himmel von unserem Standpunkt aus oder in der Nähe der Erde ist winzig – möglicherweise nur ein Tausendstel Grad oder sogar weniger. Noch schwieriger zu beobachten als die Bewegungen der Doppelsterne sind die winzigen „Wobbles“ eines Muttersterns, die durch die Bewegung eines kreisenden Planeten (**Exoplanet**\*) um ihren gemeinsamen Massenmittelpunkt verursacht werden – in einem Planeten-Stern-System befindet sich das Baryzentrum im Mutterstern. Um diese winzigen Bewegungen zu entdecken, muss die Position der Sterne sehr genau und über einen längeren Zeitraum vermessen werden, um den „Wobble“ aufzuspüren.

### Schon gewusst?

Im Dezember 2013 startete die Europäische Weltraumorganisation das Observatorium Gaia (Abbildung X3), dessen Aufgabe darin besteht, die Positionen und Merkmale von etwa 1,2 Milliarden Sternen in unserer eigenen Milchstraßen-Galaxie genau zu erfassen. Gaia folgt auf die Fußstapfen der früheren ESA-Mission Hipparcos.

– Hipparcos wurde 1989 gestartet (Abbildung X4). Über einen Zeitraum von vier Jahren führte Hipparcos eine ausführliche Vermessung der Positionen von etwa 120.000 Sternen am Himmel durch. Durch die Messungen von Hipparcos konnten die Baryzentren vieler Doppelstern-Systeme ermittelt werden. Bei einigen Systemen stimmten die Ergebnisse nicht mit den Erwartungen überein, die die Möglichkeit von Begleitsternen vermuten ließen, von denen einige später durch andere Beobachtungen bestätigt wurden. Die Untersuchung der Positionen und Bewegungen von Sternen am Himmelszelt, auch als die Wissenschaft von der **Astrometrie**\* bekannt, ist nur eine Technik, die Astronomen zur Ermittlung des Vorhandenseins von Begleitsternen oder Planeten nutzen. Eine weitere ergänzende Technik, die Technik der so genannten **Radialgeschwindigkeit**\*, nutzt den Dopplereffekt, um in dem beobachteten Lichtspektrum eines Sterns nach einem „Wobble“ Ausschau zu halten. Zu einer Erörterung dieser Techniken sowie anderer Methoden zum Aufspüren von Exoplaneten siehe den Link „Wie lässt sich ein extrasolarer Planet finden“ unter Links S.24.

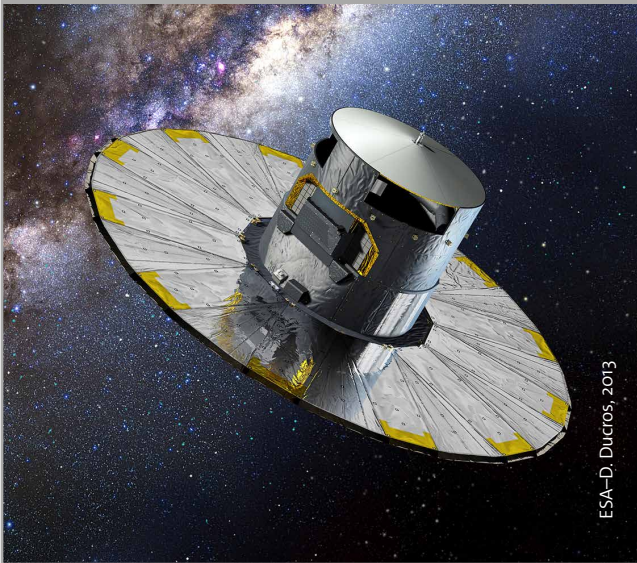
\* **Astrometrie**: ein Zweig der Astronomie, der sich mit genauen Messungen von Position und Bewegung von Himmelskörpern befasst.

**Doppelstern**: zwei Sterne in Umlaufbahn um ihr gemeinsames Baryzentrum.

**Exoplanet/extrasolarer Planet**: ein Planet, der einen anderen Stern als die Sonne umkreist.

**Radialgeschwindigkeit**: die Geschwindigkeit eines Objekts entlang der Sichtlinie zwischen zwei Objekten.

Abbildung X3



↑ Künstlerische Darstellung der ESA-Raumsonde Gaia.

Abbildung X4



↑ Die Raumsonde Hipparcos erbrachte eine Positionsvermessung von zwei Millionen Sternen.

## Wie wird das Baryzentrum-Konzept genutzt, um einen Planeten mit einem natürlichen Satelliten (Mond) und zwei Planeten in einer gegenseitigen Umlaufbahn um ein Baryzentrum (ein Doppelplaneten-System) auseinanderzuhalten?

In einem System, in dem zwei Objekte umeinander kreisen, befindet sich das Baryzentrum stets näher am Massenmittelpunkt des Objekts mit der größeren Masse. Je größer der Massenunterschied zwischen den beiden Objekten ist, desto näher befindet sich das Baryzentrum bei dem Massenmittelpunkt des Objekts mit der größeren Masse.

Deshalb liegt das Baryzentrum bei einem Zweikörper-System mit einem sehr großen Massenunterschied der Objekte in dem Objekt mit der größeren Masse. Deswegen scheint das leichtere Objekt das schwerere zu umkreisen. Auf einfache Weise lässt sich das so veranschaulichen:

Bei einem **Planeten-Mond-System** liegt das Baryzentrum innerhalb des Objekts mit der größeren Masse (dem Planeten).

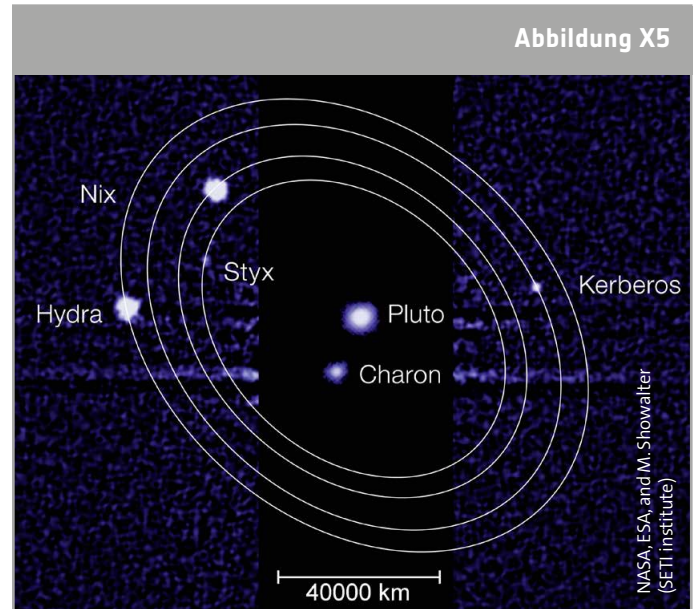
Bei einem **Doppelplaneten-System** liegt das Baryzentrum außerhalb der Oberflächen beider Objekte.

Baryzentrische Prinzipien gelten für jedes Orbitalsystem wie Doppel- und Mehrfachstern-Systeme sowie für Planeten, die ihre Muttersterne umkreisen, und auch Satelliten und Raumsonden, die die Erde und andere Körper des Sonnensystems umkreisen.



## Ist Pluto tatsächlich Teil eines „Doppel-Zwergplaneten“-Systems?

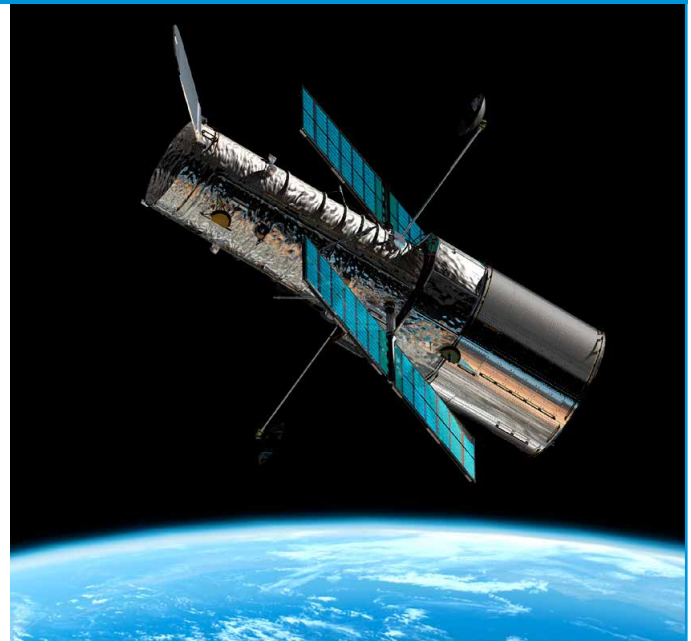
Zwar wurde Pluto (2006) auf den Status eines **Zwergplaneten\*** herabgestuft, wiederholte Beobachtungen seiner Monde lassen jedoch vermuten, dass das Pluto-System komplexer ist. Pluto wird von fünf Monden begleitet. Der nächste dieser Monde, Charon, kommt in Größe und Masse Pluto viel näher als die vier anderen Monde. Tatsächlich befindet sich das gesamte System in einer Umlaufbahn um das Baryzentrum zwischen Pluto und Charon anstatt dass sich das Baryzentrum innerhalb des Radius von Pluto befindet, wie es für einen Zwergplaneten mit fünf Monden zu erwarten wäre. Deshalb werden Pluto und Charon mitunter als ein Doppel-Zwergplaneten-System in Begleitung vier kleinerer Monde bezeichnet. Abbildung X5 zeigt ein Bild des Weltraumteleskops Hubble (HST) von Pluto und Charon in Begleitung ihrer vier kleinen Monde. Die Umlaufbahnen der vier kleineren Monde überlagern sich. Aus Abbildung X5 wird deutlich, dass das Baryzentrum des Systems zwischen Pluto und Charon liegt.



↑ Bild des Weltraum-Teleskops Hubble (HST) mit den vier kleinen Monden, die das Pluto-Charon-Doppel-Zwergplaneten-System umkreisen. Die Umlaufbahnen der kleineren Monde überlagern sich.

### Schon gewusst?

Das Weltraum-Teleskop Hubble (HST) ist ein gemeinsames Projekt von ESA und NASA. Es wurde 1990 in eine Umlaufbahn 600 km über der Erde geschickt und ist eins der größten und erfolgreichsten Weltraum-Observatorien, die es je gab. Von einem Standpunkt außerhalb der Erde mit ihrer sich ständig bewegenden Atmosphäre, durch die das aus dem Weltraum auf den Boden eintreffende Licht verzerrt wird, lieferte HST erstaunliche hochauflösende Bilder von Tausenden Weltraum-Objekten wie Planeten, Doppelstern-Systemen, Galaxien, Sternennebeln und Regionen, in denen sich Sterne bilden. HST hat die Sicht auf unser Universum drastisch verbessert.



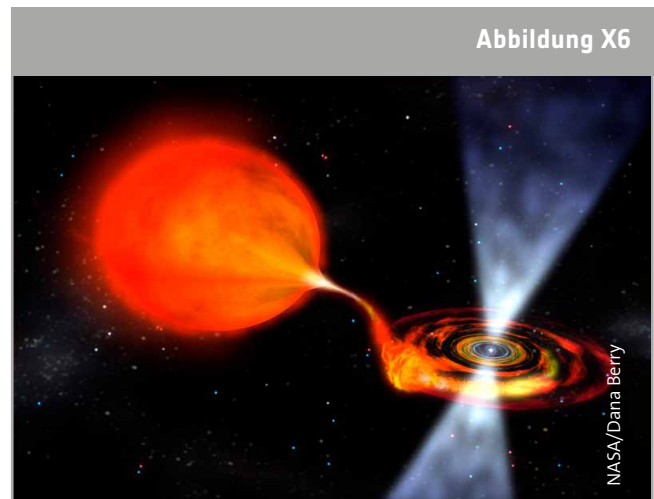
\* **Zwergplanet:** ein Objekt aus planetarischer Masse, das weder ein Planet noch ein natürlicher Satellit ist. Ein Zwergplanet weist genügend Masse auf, damit seine Form grob kugelförmig ist. Er umkreist die Sonne direkt, hat aber die Umgebung seiner Umlaufbahn nicht bereinigt. Der Ausdruck Zwergplanet wurde 2006 von der Internationalen Astronomischen Union übernommen. Derzeit gibt es im Sonnensystem fünf Objekte, die als Zwergplaneten klassifiziert sind – Pluto, Ceres, Haumea, Makemake und Eris. Ceres liegt innerhalb des Asteroidengürtels, während die vier anderen Zwergplaneten jenseits der Umlaufbahn von Neptun liegen. Es wird vermutet, dass viel mehr Zwergplaneten in den eisigen Außenbereichen des Sonnensystems existieren.



## Was passiert in Doppelstern-Systemen, wenn zwei Objekte mit sehr großer Masse eng umeinander kreisen?

Ein Doppelstern-System besteht aus zwei Sternen, die so nahe beieinander liegen, dass die Gravitations-Wechselwirkungen sie dazu zwingen, ein gemeinsames Baryzentrum zu umkreisen. Bei Doppelsternen, die sehr nahe beieinander liegen, kommt es oft zu einer Masseübertragung von einem Stern zu dem anderen. Abbildung X6 zeigt eine künstlerische Darstellung eines derartigen engen Doppelstern-Systems, bei dem ein rotierender **Neutronenstern\*** mit der Bezeichnung **Pulsar\*** Masse von seinem Begleitstern abzieht.

Wie würde sich diese Masseübertragung auf das Baryzentrum und somit die orbitalen Merkmale dieses Doppelstern-Systems auswirken? Da der Pulsar mehr Masse von dem Begleitstern abzieht, nimmt seine Masse zu, während die Masse des Begleitsterns abnimmt. Dadurch verlagert sich das Baryzentrum näher zu dem Pulsar. Im Laufe der Zeit scheint der Begleitstern den Pulsar zu umkreisen.



↑ Künstlerische Darstellung eines rasch rotierenden Sterns mit der Bezeichnung Pulsar, der Masse von seinem Begleitstern abzieht. Die starke Schwerkraft des dichten Pulsars (rechts) zieht Material von dem Begleitstern (links) an.

\* **Neutronenstern:** der Sternenrest eines großen Sterns, der zu Ende seines Lebens explodierte. Neutronensterne sind extrem klein, haben jedoch eine große Masse und deshalb eine sehr hohe Dichte.

**Pulsar:** ein rotierender Neutronenstern mit einem starken Magnetfeld. Pulsare senden ein Strahlenbündel aus, das bei Ausrichtung auf die Erde als ein periodischer „Blitz“ im Funkwellenbereich wahrzunehmen ist.

## Glossar

**Astrometrie:** ein Zweig der Astronomie, der sich mit genauen Messungen von Position und Bewegung von Himmelskörpern befasst.

**Baryzentrum:** der Massenmittelpunkt eines Systems.

**Doppelstern:** zwei Sterne in Umlaufbahn um ihr gemeinsames Baryzentrum.

**Exoplanet/extrasolarer Planet:** ein Planet, der einen anderen Stern als die Sonne umkreist.

**Massenmittelpunkt:** der einzige Punkt in einem Objekt oder System, an dem die Gewichtskomponenten für jeden Punkt die Resultierende Null annehmen. Ein Objekt befindet sich im Gleichgewicht, wenn es an einem Punkt an diesem Ort aufgehängt wird.

**Moment:** eine Tendenz zur Erzeugung von Bewegung, insbesondere einer Rotation um einen Punkt oder eine Achse.

**Neutronenstern:** der Sternenrest eines großen Sterns, der zu Ende seines Lebens explodierte. Neutronensterne sind extrem klein, haben jedoch eine große Masse und deshalb eine sehr hohe Dichte.

**Pulsar:** ein rotierender Neutronenstern mit einem starken Magnetfeld. Pulsare senden ein Strahlenbündel aus, das bei Ausrichtung auf die Erde als ein periodischer „Blitz“ im Funkwellenbereich wahrzunehmen ist.

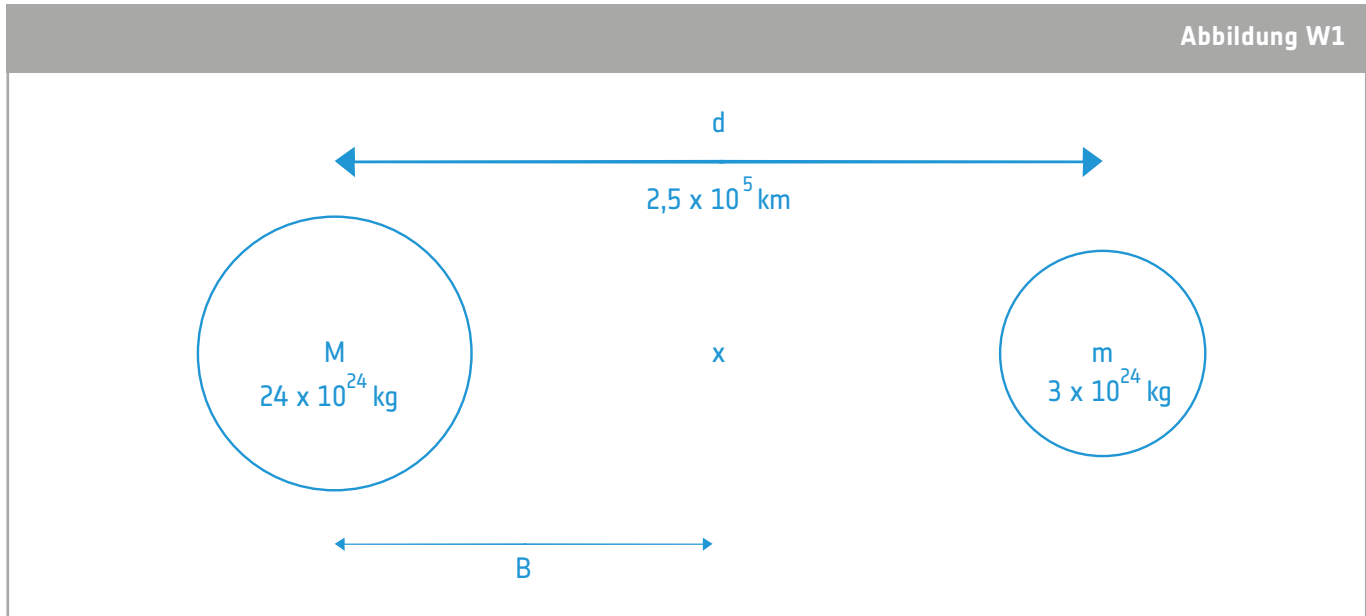
**Radialgeschwindigkeit:** die Geschwindigkeit eines Objekts entlang der Sichtlinie zwischen zwei Objekten.

**Zwergplanet:** ein Objekt aus planetarischer Masse, das weder ein Planet noch ein natürlicher Satellit ist. Ein Zwergplanet weist genügend Masse auf, damit seine Form grob kugelförmig ist. Er umkreist die Sonne direkt, hat aber die Umgebung seiner Umlaufbahn nicht bereinigt. Der Ausdruck Zwergplanet wurde 2006 von der Internationalen Astronomischen Union übernommen. Derzeit gibt es im Sonnensystem fünf Objekte, die als Zwergplaneten klassifiziert sind – Pluto, Ceres, Haumea, Makemake und Eris. Ceres liegt innerhalb des Asteroidengürtels, während die vier anderen Zwergplaneten jenseits der Umlaufbahn von Neptun liegen. Es wird vermutet, dass viel mehr Zwergplaneten in den eisigen Außenbereichen des Sonnensystems existieren.

## Baryzentren im Weltraum

### Fragen

1. Findet für die in Abbildung W1 gezeigten Objekte den Abstand des Baryentrums vom Mittelpunkt des Objekts M und danach vom Mittelpunkt des Objekts m.



$B$  = Abstand vom Baryzentrum zum Mittelpunkt des Objekts mit Masse  $M$  (km)

$d$  = Abstand zwischen den Massenmittelpunkten der beiden Objekte (km)

$m$  = Masse des kleineren Objekts (kg)

$M$  = Masse des größeren Objekts (kg)

Gemäß der Ableitung auf den Seiten 7-8 ergibt sich daraus der Abstand vom Mittelpunkt des Objekts mit Masse  $M$  zum Baryzentrum als:

$$B = \frac{md}{(M + m)}$$

Durch Einsetzen der Zahlen ergibt sich

$$B = \frac{(3 \times 10^{24})(2,5 \times 10^5)}{(24 + 3) \times 10^{24}}$$

$$B = 27.778 \text{ km}$$

**The Baryzentrum liegt ungefähr 28.000 km vom Mittelpunkt des Objekts M entfernt.**

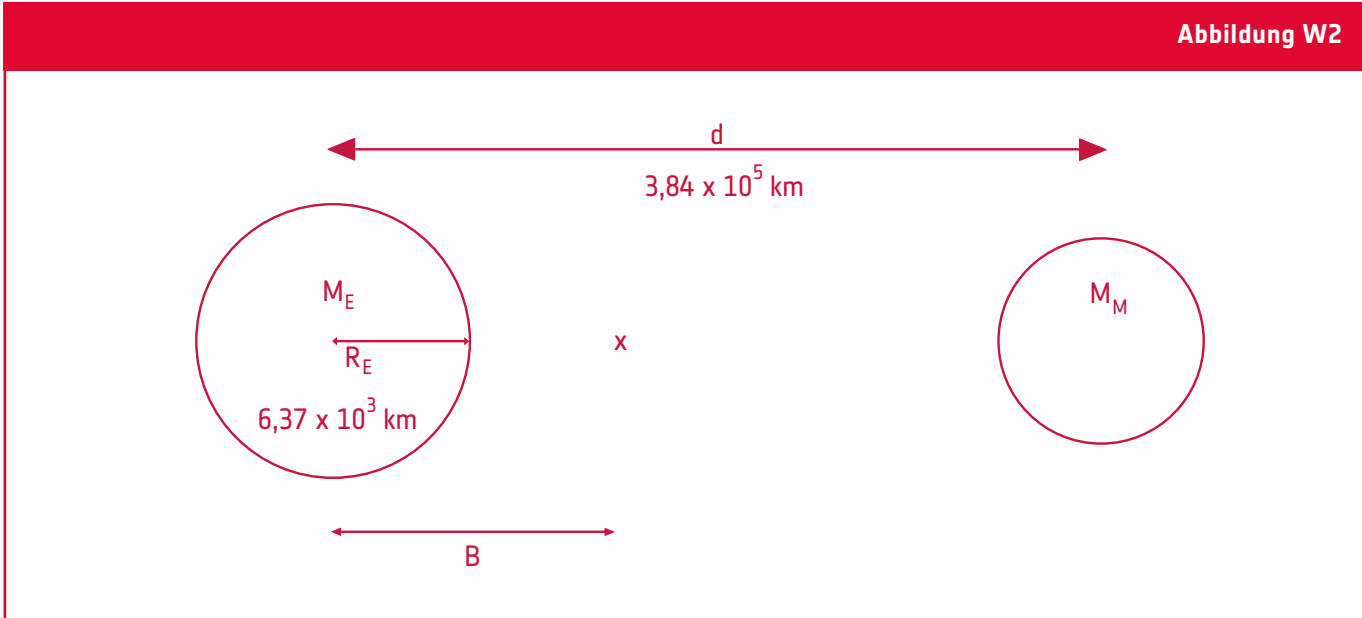
Die beiden Objekte haben einen Abstand von  $2,5 \times 10^5$  km

Somit beträgt der Abstand des Objekts m vom Baryzentrum:

$$2,5 \times 10^5 - 2,8 \times 10^4 = 2,22 \times 10^5 \text{ km}$$

**Das Baryzentrum liegt ungefähr 222.000 km vom Mittelpunkt des Objekts m entfernt.**

2. a) Der Mond hat eine Masse von 0,0123  $M_E$  (wobei  $M_E$  die Masse der Erde ist), und der Abstand vom Erdmittelpunkt zum Mittelpunkt des Mondes beträgt 384.000 km. Wenn der Radius der Erde  $6,37 \times 10^3$  km beträgt, zeigt, dass Erde und Mond ein Planeten-Mond-System bilden.



- B = Abstand vom Baryzentrum zum Mittelpunkt des Objekts mit Masse M (km)
- d = Abstand zwischen dem Erdmittelpunkt und dem Mittelpunkt des Mondes (km)
- $M_L$  = Masse des Mondes (kg) = m
- $M_T$  = Masse der Erde (kg) = M

Gemäß obenstehender Aussage gilt

$$B = \frac{md}{(M + m)}$$

Die Massen der Erde und des Mondes sind nicht angegeben, nur ihr Verhältnis. Deshalb gilt unter der Annahme, dass die Erde eine Masse von 1 hat, dass der Mond eine Masse von 0,0123 hat. Somit

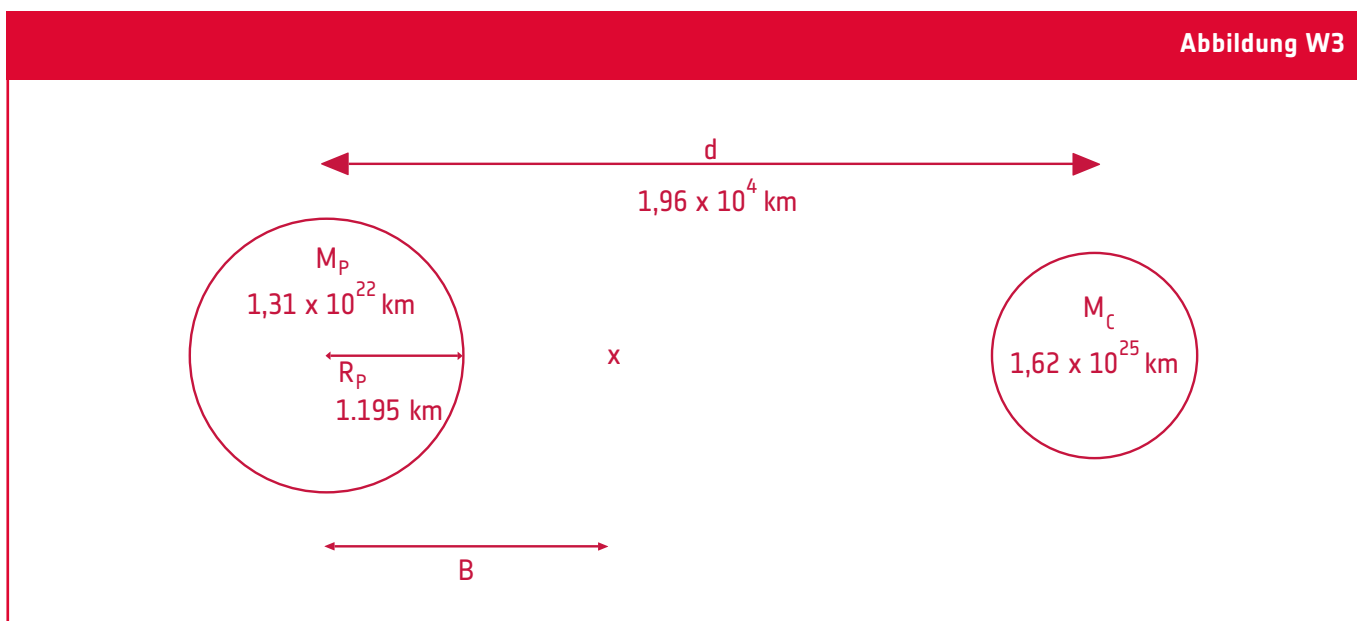
$$B = \frac{0,0123 \times (3,84 \times 10^5)}{(0,0123 + 1)} = 4.666 \text{ km}$$

Da der Radius der Erde 6.370 km beträgt, liegt das Baryzentrum innerhalb der Erde, und somit gelten Erde und Mond als ein Planeten-Mond-System.

b) Einige Daten für Pluto und dessen größtem Mond Charon aus den Informationsblättern der NASA zu Monden und Planeten sind nachstehend aufgeführt:

Masse von Pluto	$1,31 \times 10^{22} \text{ kg}$
Radius von Pluto	1.195 km
Masse von Charon	$1,62 \times 10^{21} \text{ kg}$
Abstand der Mittelpunkte	19.600 km

Zeigt, ob Pluto und Charon ein Planeten-Mond- oder ein Doppelplaneten-System sind.



$B$  = Abstand vom Baryzentrum zum Mittelpunkt des Objekts mit Masse  $M$  (km)

$d$  = Abstand zwischen dem Mittelpunkt von Pluto und dem Mittelpunkt von Charon (km)

$M_p$  = Masse von Pluto (kg) =  $m$

$M_c$  = Masse von Charon (kg) =  $M$

Somit gilt

$$B = \frac{md}{(M + m)}$$

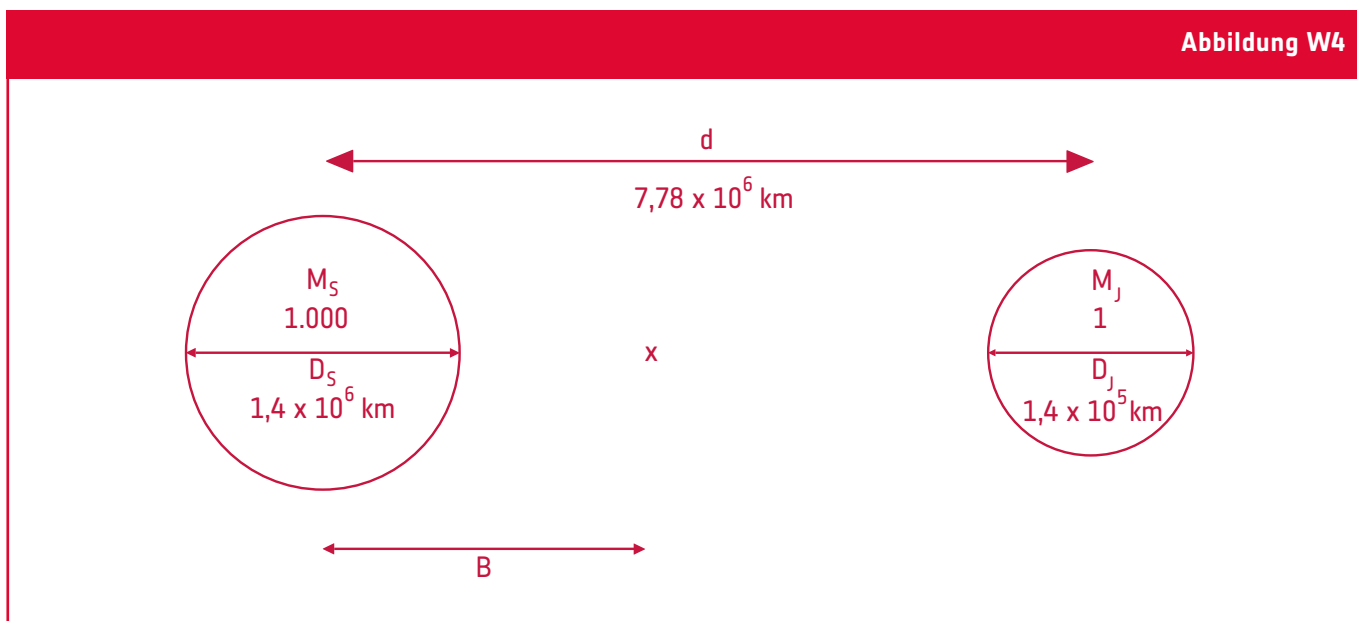
Durch Einsetzen der Zahlen erhält man

$$B = \frac{(1,62 \times 10^{21}) \times (1,96 \times 10^4)}{(1,31 \times 10^{22} + 1,62 \times 10^{21})} = 2.157 \text{ km}$$

Da der Radius von Pluto 1.195 km beträgt, liegt das Baryzentrum außerhalb von Pluto, und somit sind Pluto und Charon ein Doppel-(Zwerg)-Planeten-System.

3. Die Sonne hat einen Durchmesser von 1,4 Mio. km, und Jupiter hat einen Radius von 140.000 km. Der mittlere Abstand Sonne - Jupiter beträgt 778 Mio. km. Die Masse der Sonne macht etwa das 1.000-Fache der Masse von Jupiter aus. Berechnet die Position des Baryzentrums des Sonne-Jupiter-Systems und äußert euch zu dessen Ort.

Bei Annahme, dass die der Masse von Jupiter  $M_J = m$  beträgt, beträgt somit die Masse der Sonne  $M_S = 1.000 = M$



Somit gilt

$$B = \frac{md}{(M + m)}$$

deshalb

$$B = \frac{1 \times (7,78 \times 10^6)}{(1.000 + 1)} = 777.200 \text{ km}$$

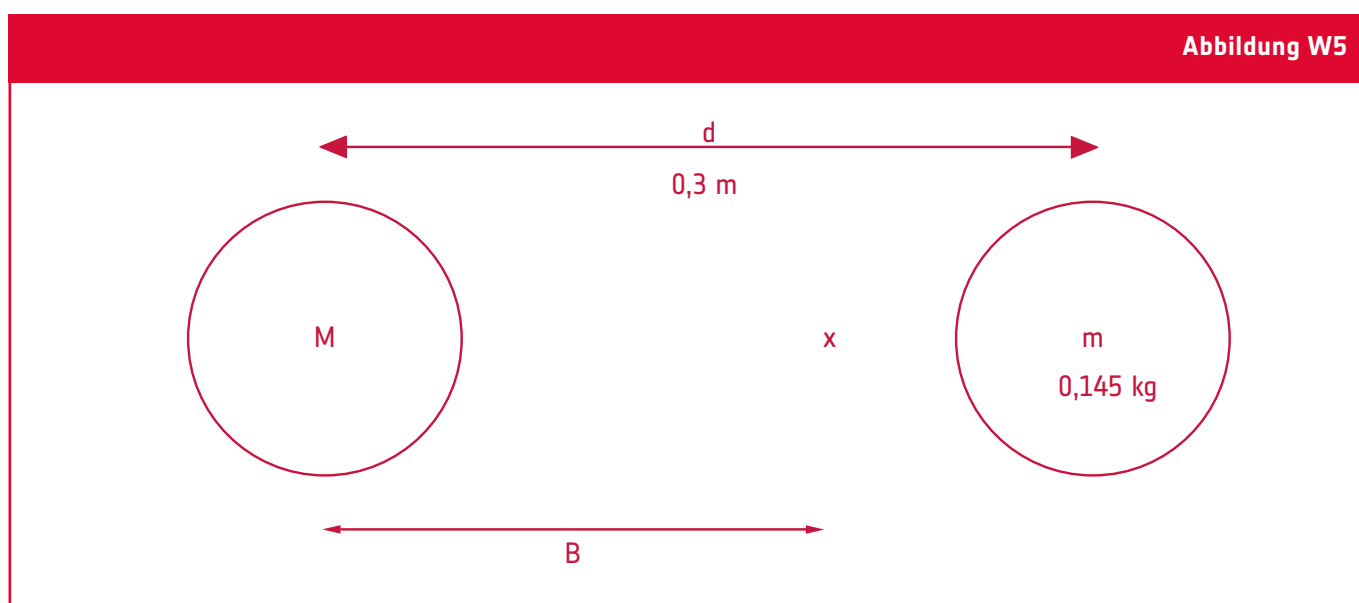
**Der Sonnenradius beträgt ungefähr 700.000 km. Somit liegt das Baryzentrum des Sonne-Jupiter-Systems knapp außerhalb der Sonne.**

4. Im Video Teach with space – Baryzentrische Bälle im Weltraum | VP07b demonstriert die ESA-Astronautin Samantha Cristoforetti das baryzentrische Prinzip bei der Mikrogravitation an Bord der Internationalen Raumstation (ISS).

Beim ersten Szenario verbindet Samantha zwei Baseball-Bälle mit einer Stricknadel. Die beiden Bälle haben die gleiche Masse, und deshalb liegt das Baryzentrum im geometrischen Mittelpunkt des Systems, dem Mittelpunkt der Stricknadel. Wenn Samantha auf einen der Bälle eine Kraft ausübt, rotiert das System um das Baryzentrum. Wenn Samantha diese Kraft zum zweiten Mal ausübt, diesmal auf die Position des Baryzentrums, verlagert (bewegt) sich das gesamte System durch den Raum, rotiert jedoch nicht.

Beim zweiten Szenario ersetzt Samantha einen der Baseball-Bälle durch einen anderen Ball gleicher Größe, jedoch unterschiedlicher Masse. Wenn Samantha eine Kraft auf den neuen Ball ausübt, rotiert das System um das Baryzentrum, das sich nicht mehr im geometrischen Mittelpunkt des Systems befindet. Wenn Samantha eine Kraft auf den Ort des Baryzentrums ausübt, rotiert das System wie zuvor nicht mehr, sondern verlagert sich nur.

Angenommen, die Masse eines Baseball-Balls betrage 0,145 kg, die Länge der Stricknadel 0,3 m und der Ort des Baryzentrums befinde sich auf einem Viertel des Abstands zwischen dem Mittelpunkt des Baseball-Balls und dem Mittelpunkt des anderen Balls, wieviel beträgt dann die Masse des zweiten Balls? Welches Objekt hat die größere Masse?



$m$  = Masse des Baseball-Balls = 0,145 kg

$M$  = Masse des zweiten Balls

$d$  = Länge der Stricknadel = 0,3 m

$B$  = Abstand vom Baryzentrum zum Mittelpunkt des zweiten Balls

Das Baryzentrum liegt näher am Baseball-Ball, ungefähr ein Viertel der Länge der Stricknadel vom Mittelpunkt des Baseball-Balls. Deshalb beträgt der Abstand des Baryzentrums zum Mittelpunkt des zweiten Balls:

$$B = 0,75 \times 0,3 = 0,225 \text{ m}$$

Durch Umordnung

$$B = \frac{md}{(M + m)}$$

ergibt sich

$$M = \left( \frac{md}{B} \right) - m = \left( \frac{0,145 \times 0,3}{0,225} \right) - 0,145 = 0,048 \text{ kg}$$

Der zweite Ball hat eine Masse von 48 g. Der Baseball-Ball ist der Ball mit der größeren Masse.

## LINKS

### Sammlung Teach with space

ESA teach with space – marble-ous ellipses Leitfaden für Lehrer und Aufgaben für Schüler | P02: [esamultimedia.esa.int/docs/edu/P02\\_Marble-ous\\_ellipses\\_teacher\\_guide.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/edu/P02_Marble-ous_ellipses_teacher_guide.pdf)

ESA teach with space – Video zu marble-ous ellipses | VP02: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Marble-ous\\_ellipses\\_-\\_classroom\\_demonstration\\_video\\_VP02](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Marble-ous_ellipses_-_classroom_demonstration_video_VP02)

ESA teach with space – Video zu cooking a comet | VP06: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/10/Cooking\\_a\\_comet\\_ingredients\\_for\\_life\\_-\\_classroom\\_demonstration\\_video\\_VP06](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/10/Cooking_a_comet_ingredients_for_life_-_classroom_demonstration_video_VP06)

ESA teach with space – Video zu Baryzentrische Bälle | VP07a: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2015/04/Barycentric\\_balls\\_-\\_classroom\\_demonstration\\_video\\_VP07a](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2015/04/Barycentric_balls_-_classroom_demonstration_video_VP07a)

ESA teach with space – Video zu Baryzentrische Bälle im Weltraum | VP07b: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2015/04/Barycentric\\_balls\\_in\\_space\\_-\\_classroom\\_demonstration\\_video\\_VP07b](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2015/04/Barycentric_balls_in_space_-_classroom_demonstration_video_VP07b)

### Missionen and Wissenschaft im Zusammenhang mit der ESA

ESA-Mission Gaia: [www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Gaia](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia)

Broschüren zu Gaia (in 7 europäischen Sprachen): [www.esa.int/Education/Little\\_Books\\_of\\_Gaia](http://www.esa.int/Education/Little_Books_of_Gaia)

iPhone App zu Gaia: [blogs.esa.int/gaia/2014/09/01/gaia-in-your-pocket-mapping-the-galaxy-with-the-new-gaia-app/](http://blogs.esa.int/gaia/2014/09/01/gaia-in-your-pocket-mapping-the-galaxy-with-the-new-gaia-app/)

Science@ESA vodcast: Episode 6: Kartierung der Galaxie – von Hipparcos zu Gaia: [www.esa.int/Education/Teachers\\_Corner/Science\\_ESA\\_Episode\\_6\\_Charting\\_the\\_Galaxy\\_-\\_from\\_Hipparcos\\_to\\_Gaia](http://www.esa.int/Education/Teachers_Corner/Science_ESA_Episode_6_Charting_the_Galaxy_-_from_Hipparcos_to_Gaia)

ESA-Mission Hipparcos: [www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Hipparcos\\_overview](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Hipparcos_overview)

Erstellt euren eigenen Hipparcos-Sternenglobus: [www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Create\\_your\\_own\\_Hipparcos\\_star\\_globe2](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Create_your_own_Hipparcos_star_globe2)

Weltraum-Teleskop Hubble der ESA und NASA: [sci.esa.int/hubble/](http://sci.esa.int/hubble/)

Wie findet man einen extrasolaren Planeten: [www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/How\\_to\\_find\\_an\\_extrasolar\\_planet](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/How_to_find_an_extrasolar_planet)

### Wissenschaftliche Mond- und Planeten-Datenbank der NASA

Hauptseite: [nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/)

Verzeichnis von Informationsblättern zu Planeten: [nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planetfact.html](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planetfact.html)

Informationsblatt zur Sonne: [nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html)



**teach with space – Baryzentrische Bälle | P07**

[www.esa.int/education](http://www.esa.int/education)

Das ESA Education Office (ESA-Bildungsbüro) freut sich über Rückmeldungen  
und Kommentare

[teachers@esa.int](mailto:teachers@esa.int)

**Eine Produktion von ESA Education (ESA-Bildungsbüro)**

Copyright © European Space Agency 2015