




KIRSTEN BIEDERMANN · ANDERS FLORÉN · PHILIPPE JEANJACQUOT · DIONYSIS KONSTANTINOU · CORINA TOMA

# SOUS PRESSION



 Ballon, masse, équilibrage, pompe, pression, gaz parfait, collision élastique, coefficient de restitution

 Physique, mathématiques, TIC

 Ce module est adapté à différents niveaux scolaires allant de l'école primaire au collège / lycée. Les deux sections qui le composent sont adaptables à différents niveaux :

- niveau 1 : Enseignement primaire (âge : 9 – 12 ans)
- niveau 2 : Enseignement secondaire (niveau collège, âge : 12 – 15 ans)
- niveau 3 : Pour l'enseignement secondaire (niveau lycée, âge : 15 – 18 ans)

## 1 | SYNOPSIS

Vous êtes-vous déjà demandé quel est le rôle de la pression d'air à l'intérieur d'un ballon de football ? Ce module présente différentes activités centrées sur ce thème. La première commence avec la mesure de la masse d'air présente à l'intérieur du ballon, et montre qu'elle est directement proportionnelle avec la pression interne. La deuxième activité montre que la hauteur maximale atteinte par le ballon après le premier choc ou le premier rebond dépend de la pression d'air interne, et souligne l'importance de l'état du sol.

## 2 | INTRODUCTION THÉORIQUE

Notre objectif est de montrer, par le biais d'expériences simples, que les élèves sont capables de mesurer la masse d'air présente à l'intérieur du ballon, puis de vérifier la dépendance linéaire entre la pression et la masse selon la loi du gaz parfait. Enfin, ils verront le rôle de la pression dans le rebond, et appliqueront le principe de la conservation de l'énergie mécanique.

### 2 | 1 Partie 1 : Masse d'air et pression

Voir le détail des activités de la partie 3 *Tâches des élèves*.

#### Niveau 1 :

On pourra mettre en oeuvre deux activités différentes et indépendantes. La première est centrée sur la notion de masse d'air et sur la méthode de mesure de la masse d'air présente à l'intérieur d'un ballon. Le professeur pourra employer une approche d'investigation, en posant la question suivante : « comment peut-on déterminer la masse d'air présente à l'intérieur d'un ballon ? ». Les élèves proposeront et effectueront des expériences comme l'utilisation d'une balance, le gonflage du ballon et la mesure de la masse du ballon gonflé. Pour la seconde activité, ils se concentreront sur le volume et sur les méthodes de calcul du volume intérieur du ballon (p. ex. au moyen d'un seau d'eau).

#### Niveau 2 :

Mesurer la masse d'air enfermée dans le ballon dans des conditions de pression différentes. Trouver la relation entre la pression et la masse d'air (on pose que le volume intérieur du ballon ne change pas lorsque la pression augmente). Les élèves pourront dessiner un graphique représentant la masse de gaz en fonction de la pression. Ils pourront également mesurer le volume intérieur

du ballon. Cette expérience permet aussi de découvrir le phénomène de poussée du ballon (dans l'air).

#### Niveau 3 :

Pour ce niveau, les élèves pourront faire les mêmes expériences que ceux du niveau 2. Ils compareront leur schéma de la dépendance entre la masse d'air et la pression d'air à l'intérieur du ballon avec la loi du gaz parfait, et ils calculeront les différentes valeurs de gaz à partir de la courbe obtenue.

### 2 | 2 Partie 2 : Hauteur de rebond par rapport à la pression

#### Niveau 1 :

Concentrez-vous sur les différences entre hauteurs de rebond (du point de vue des propriétés) : Laissez tomber deux ballons de la même hauteur et notez l'effet direct des différentes pressions exercées à l'intérieur du ballon. Choisissez un protocole, sélectionnez le type de données à collecter, recueillez les données, puis discutez-en une fois l'expérience terminée.

#### Niveau 2 :

Concentrez-vous sur les différences entre hauteurs de rebond (du point de vue des propriétés) : Mesurez la hauteur maximum atteinte après le premier rebond, puis répétez l'expérience dix fois, en cherchant une méthode pour déterminer la hauteur, par exemple en utilisant un smartphone pour faire un film de haute sensibilité pour faire un film. Découvrir les facteurs aléatoires et autres facteurs qui expliquent les résultats variables, puis calculer la hauteur moyenne.

#### Niveau 3 :

Privilégier l'utilisation du modèle mathématique de chute libre pour analyser les données. En commençant par le niveau 2, analysez les données afin de déterminer la perte d'énergie, en utilisant la formule  $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ , et en comparant l'énergie produite au début de l'expérience ( $h = 1$  m ou une autre valeur) avec celle produite après le premier contact du ballon avec le sol. Les élèves peuvent aussi calculer la durée d'un rebond et la vitesse maximum du premier contact du ballon avec le sol, et le mesurer. Enfin, ils pourront comparer les valeurs d'énergie potentielle et d'énergie cinétique ( $E_{pot}$  et  $E_{cin}$ ), et calculer le coefficient de restitution (voir 3.2.1).

$E_{pot}$  : énergie potentielle [J]

$m$  : masse du ballon [g]

$g$  : accélération de la pesanteur ;  $g = 9,81 \frac{m}{s^2} = 9,81 \frac{N}{kg}$

$h$  : hauteur atteinte par le ballon [m]

La partie 2 peut être réalisée sur différentes surfaces : herbe, sol de gymnase, asphalte, béton, pelouse mouillée, pelouse avec différentes hauteurs d'herbe, et sable. Les élèves de tous niveaux émettront leurs hypothèses, en discuteront, et analyseront leurs expériences sous des angles différents. Pour approfondir, on pourra faire un tableau indiquant la pression nécessaire pour obtenir la même hauteur de rebond sur différentes surfaces, par exemple dans différents stades.

### 3 | TÂCHES DES ÉLÈVES

Ce module est divisé en deux parties : calcul de la masse de gaz par rapport à la pression à l'intérieur du ballon, et calcul du rapport entre la hauteur du rebond et la pression à l'intérieur du ballon.

Il existe deux méthodes de calcul de la pression.

La pression relative est la différence entre la pression à l'intérieur du ballon et la pression atmosphérique (à l'extérieur du ballon) ; on mesure la pression relative à l'aide d'un manomètre. C'est cette valeur qui est utilisée dans la partie 1.

La pression absolue correspond à la pression totale. C'est cette valeur qui est utilisée dans la partie 2.

#### 3 | 1 | Partie 1 : Calculer la masse de gaz par rapport à la pression

Matériel nécessaire : une pompe, un manomètre (appareil de mesure de la pression), une balance (avec une précision de 0,1 g et une capacité de 1000 g), un embout pour gonfler le ballon, un verre pour placer le ballon sur la balance, un ballon de football.

Si l'école ne possède pas l'équipement, on peut utiliser du matériel bon marché.

(Une pompe avec manomètre intégré est le moyen le plus pratique. À défaut, on peut trouver facilement un manomètre bon marché pour pneus de voiture ; l'embout est le même que celui utilisé pour un ballon).

#### 3 | 1 | 1 Procédure

Les différentes étapes de la procédure proposée sont données ci-après. Certains éléments peuvent être omis s'ils ne sont pas adaptés au niveau de votre groupe d'élèves.



FIG. 1 Ballon à l'intérieur du seau



FIG. 2 Mesure du niveau d'eau pour obtenir le volume d'eau

#### ▪ Calculer le volume du ballon (avec de l'air et sans air à l'intérieur)

Pour calculer le volume du ballon, vous pouvez utiliser un seau rempli d'eau et mesurer les différents niveaux d'eau avec et sans le ballon. La couche externe du ballon étant en cuir, il faut veiller à ce qu'il n'absorbe pas d'eau, car cela pourrait augmenter sa masse. Pour contourner ce problème, on peut mettre le ballon dans un sac en plastique. La pression de l'eau autour du ballon maintiendra le sac collé contre le ballon. Le volume restera le même avec ou sans sac.

Si vous mesurez sans le sac, faites-le après la mesure de la masse.

Le volume peut être mesuré avec différents niveaux d'eau dans le seau. Si les élèves ne peuvent pas calculer le volume d'eau du seau, ils peuvent le remplir complètement, pousser le ballon dedans et mesurer le volume d'eau qui déborde.

Dans ce cas, le volume du ballon vide est de 1,65 l et le volume du ballon plein est de 5 l. Cela veut dire que la ballon contient  $5 \text{ l} - 1,65 \text{ l} = 3,35 \text{ l}$  d'air.



FIG. 3 Ballon sur la balance





FIG. 4 Mesure de la masse du ballon vide d'air

#### ■ Mesurer la masse du ballon rempli d'air

Mettez le verre sur la balance, tarez la balance, mettez le ballon sur la balance et mesurez sa masse.

Lors de cette expérience, nous utiliserons une balance ayant une précision de 0,1 g (et une capacité de 1000 g), un ballon de football et une pompe munie d'un manomètre.

#### ■ Mesurer la masse du ballon vide d'air

(par exemple,  $m_{\text{ballon}} = 408,0 \text{ g}$ )

#### ■ Gonfler le ballon pour maintenir la même pression à l'intérieur et à l'extérieur du ballon

La pression relative, ou la différence entre la pression extérieure et la pression intérieure du ballon, est de  $P = 0 \text{ bar}$ .

Mesurer la masse du ballon :  $m_{\text{ballon}} = 408,0 \text{ g}$  (la même masse que ci-dessus).

### 3 | 1 | 2 Analyse : Pourquoi la masse du ballon est-elle la même avec ou sans air à l'intérieur ?

- **Indice** : L'air environnant est un fluide et il génère une force qui possède les mêmes propriétés que la force produite par l'immersion d'un objet dans l'eau.
- **Réponse** : La masse d'air à l'intérieur du ballon est contrebalancée par la poussée d'air qui s'exerce autour du ballon.
- Mesurez la masse du même ballon dans des conditions de pression différentes. Le manomètre indique la pression relative.
- Saisissez les données dans une feuille de calcul. Par exemple, vous pouvez mesurer le poids correspondant à la pression relative  $P = 0,35 \text{ bar}$  ;  
 $P = 0,5 \text{ bar}$  ;  $P = 0,6 \text{ bar}$  ;  $P = 0,75 \text{ bar}$  ;  $P = 0,9 \text{ bar}$  ;  $P = 1,05 \text{ bar}$ , ou spécifiez d'autres valeurs de pression.
- Représentez la courbe  $m$  en fonction de  $P$ .
- Déterminez le modèle le plus adéquat pour la courbe (c'est une fonction linéaire).
- Montrez la relation entre l'inclinaison de la droite et la loi des gaz parfaits :  $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$

Pour aider les élèves à comprendre la loi des gaz parfaits, le professeur pourra donner quelques indices.

- **Premier indice** : La courbe linéaire est définie par la formule

$$m_{\text{total}} = a \cdot P + m_{\text{ballon}}$$

$$\text{ou } m_{\text{total}} = m_{\text{gaz}} + m_{\text{ballon}}$$

Cela veut dire que :  $m_{\text{gaz}} = a \cdot P$ .

- **Second indice** :  $n_{\text{gaz}} = \frac{m_{\text{gaz}}}{M_{\text{gaz}}}$ .

$m$  : masse [g]

$P$  : pression relative [Pa]

$a$  : coefficient de pente de la courbe [ $\frac{\text{g}}{\text{bar}}$ ]

$V$  : volume [ $\text{m}^3$ ]

$n$  : quantité de matière [mol]

$M$  : masse molaire [ $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$ ]

$R$  : constante des gaz parfaits,  $R = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$

$T$  : température [K]

- **Troisième indice** : Le gaz (l'air) est composé d'environ 20% d'oxygène et de 80% de nitrogène.

$$M_{O_2} = 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ et } M_{N_2} = 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

### 3 | 2 Partie 2 : Mesurer la hauteur du rebond par rapport à la pression

#### 3 | 2 | 1 Théorie

Vous êtes-vous déjà demandé quel est le rôle de la pression d'air à l'intérieur d'un ballon ? Nous montrerons que le coefficient de restitution  $e$  (l'élasticité) dépend de cette pression.

Qu'est-ce que le coefficient de restitution ? Lorsqu'un ballon tombe, il atterrit à une certaine vitesse sur le sol, appelée « vitesse d'approche ». Après la collision élastique avec le sol, la vitesse de séparation aura une valeur différente de la vitesse d'approche, car une partie de l'énergie cinétique sera perdue :

$$e = \frac{v_{\text{séparation}}}{v_{\text{approche}}}$$

Il est très facile de calculer ce coefficient si vous mesurez la hauteur initiale  $h_1$  de laquelle tombe le ballon, puis de mesurer la hauteur maximum  $h_2$  atteignable après que le ballon a rebondi sur le sol.

Nous utilisons le principe de la conservation de l'énergie :

$$mgh_1 = \frac{mv_{\text{approche}}^2}{2} \quad mgh_2 = \frac{mv_{\text{séparation}}^2}{2}$$

$$\text{Donc : } e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$

$e$  : coefficient de restitution

$v$  : vitesse [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]

$m$  : masse [g]

$g$  : accélération de la pesanteur ;  $g = 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$

$h$  : hauteur [m]

3 | 2 | 2 **L'expérience**

On laisse le ballon tomber d'une certaine hauteur ( $h_1$ ), puis on note la hauteur ( $h_2$ ) du rebond sur le sol. On peut enregistrer ces mesures de hauteur à l'aide de la vidéo.



FIG. 5 Tenir le ballon à une hauteur  $h_1$  (gauche) ; laisser tomber le ballon (droite)

Cette expérience peut être réalisée à l'aide de différentes sortes de ballons et de différents types de surfaces [1].

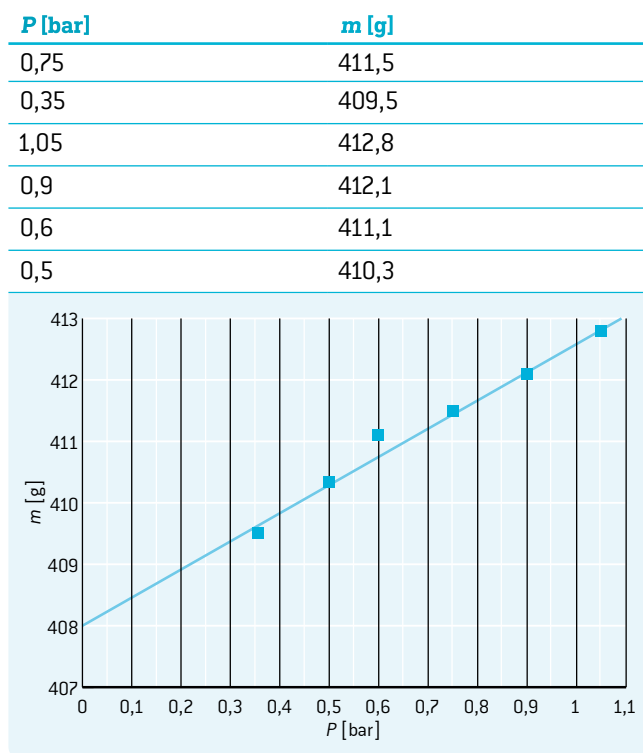
4 | **CONCLUSION**

4 | 1 **Partie 1 : Mesurer la masse de gaz par rapport à la pression**

4 | 1 | 1 **Exemple de mesure de la masse par rapport à la pression exercée sur le ballon**

La masse du ballon est  $m_{ballon} = 408,0$  g, avec  $P = 0$  bar. Le volume d'air à l'intérieur du ballon est  $V = 3,35$  L.

FIG. 6  $m$  [g] par rapport à  $P$  [bar] (pression relative)



4 | 1 | 2 **Exemple de calcul basé sur la loi des gaz parfaits :**

Ici, la courbe est exprimée par l'équation  $m = 4,5711 \frac{\text{g}}{\text{bar}} \cdot P + 408,0$  g.

On constate que la masse du ballon vide d'air est de 408 grammes

ou,  $m_{total} = a \cdot P + m_{ballon}$ .

$m$  : masse totale [g]

$P$  : pression [bar]

$a$  : coefficient de pente de la courbe [ $\frac{\text{g}}{\text{bar}}$ ]

Dans ce cas  $a = 4,5711 \frac{\text{g}}{\text{bar}}$ .

La valeur de  $a$  peut être déterminée à l'aide de l'équation des gaz parfaits :  $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ .

$P$  : pression [Pa], 1 bar =  $10^5$  Pa

$V$  : volume [ $\text{m}^3$ ]

$n$  : quantité de gaz [mol]

$R$  : constante des gaz parfaits,  $R = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$

$T$  : température [K]

$M$  : masse molaire [ $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$ ]

Cela veut dire que  $n_{gaz} = \frac{P \cdot V}{R \cdot T}$  et  $m_{gaz} = M_{gaz} \cdot \frac{P \cdot V}{R \cdot T}$

ou que  $m_{gaz} = \frac{M_{gaz} \cdot V}{R \cdot T} \cdot P$ ,

et nous avons déjà vu au chapitre 3.2.1 que  $m_{gaz} = a \cdot P$ ,

donc  $a = \frac{M_{gaz} \cdot V}{R \cdot T}$ .

L'air est composé de 20 % d'oxygène environ et de 80 % de nitrogène, donc ici,

$$M_{gaz} = \frac{20 \cdot M_{O_2} + 80 \cdot M_{N_2}}{100}$$

$$M_{gaz} = \frac{20 \cdot 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 80 \cdot 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{100}$$

$$M_{gaz} = 28,8 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Dans le cas de ce ballon

$$V = 3,35 \text{ L} = 3,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$T = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$$

$$a = \frac{M_{gaz} \cdot V}{R \cdot T}$$

$$a = \frac{28,8 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 3,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{8,31 \frac{\text{J}}{\text{K mol}} \cdot 293 \text{ K}} = 3,96 \cdot 10^{-5} \frac{\text{g}}{\text{Pa}}$$

Il s'agit de la valeur  $P$  exprimée en Pa. Pour exprimer  $P$  en bars, sa valeur doit être multipliée par  $10^5$  (car 1 bar =  $10^5$  Pa).

$$a = 3,96 \frac{\text{g}}{\text{bar}}$$

La meilleure expression mathématique de la courbe est

$$a = 4,57 \frac{\text{g}}{\text{bar}}$$

Si nous comparons les deux résultats, l'écart relatif entre les deux valeurs est :

$$d = \frac{4,57 - 3,96}{4,57} = 0,13.$$

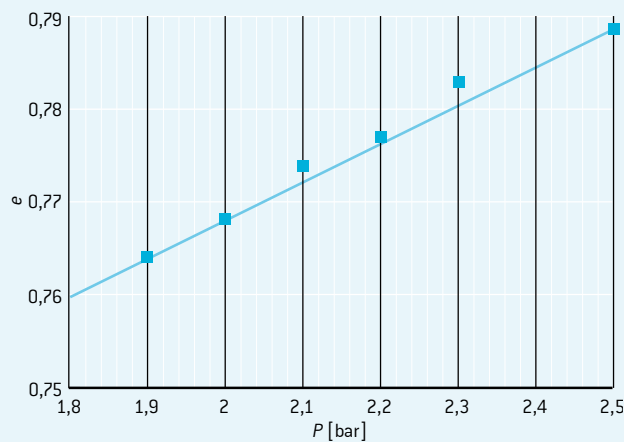
On pourra discuter des éventuelles erreurs liées à la mesure : Ici, la précision du manomètre est de 0,05 bar par mesure d'environ 1 bar. Il peut rester de l'air à l'intérieur du ballon lorsque l'on mesure le volume du ballon vide.

#### 4 | 2 Partie 2 : Mesurer le rebond par rapport à la pression

Pour notre expérience, nous avons changé la pression de l'air à l'intérieur de deux ballons différents, and nous avons obtenu les résultats suivants :

**FIG. 7 Coefficient de restitution  $e$  par rapport à la pression absolue  $P$  (Ballon 1)**

$P$ [bar]	$e$
1,9	0,764
2,0	0,768
2,1	0,774
2,2	0,777
2,3	0,783
2,5	0,789



Ici,  $P$  correspond à la pression absolue exprimée en bars.

Pour le premier ballon, la dépendance est linéaire, car la variation de pression n'est pas tellement importante.

Pour le second, nous avons obtenu une courbe. Lorsque la pression est trop importante, le ballon perd son élasticité et le coefficient de restitution ne dépasse pas une certaine limite.

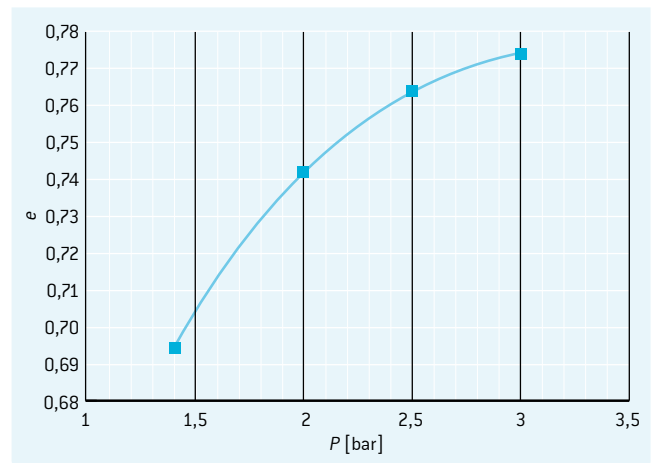
Lors de ces deux expériences, le ballon a été lancé sur un plancher, et l'on a constaté un coefficient de restitution d'environ 0,77 pour une pression de 3 bar.

Ensuite, nous avons modifié la surface du terrain, mais en maintenant la pression d'air à l'intérieur du ballon à 3 bar. Sur du gazon,

le coefficient de restitution était inférieur :  $e = 0,57$ . Sur du gazon synthétique, le coefficient est passé à 0,74<sup>[1]</sup>.

**FIG. 8 Coefficient de restitution  $e$  par rapport à la pression absolue  $P$  (Ballon 2)**

$P$ [bar]	$e$
1,4	0,695
2,0	0,742
2,5	0,764
3,0	0,774



#### 5 | CONCLUSION

Les ballons de football sont d'excellents supports pour étudier les lois des gaz, les caractéristiques de la pression et l'efficacité des rebonds. Les élèves peuvent étudier les lois de la physique au moyen d'un ballon de football, simple élément d'équipement sportif. Ils peuvent ainsi associer les lois de la physique, en l'occurrence la loi des gaz parfaits, avec les activités de leur vie quotidienne.

Il faut également noter que les activités de ce module peuvent être proposées aux élèves de tous âges entre 6 et 18 ans. Elles s'intègrent facilement dans n'importe quel programme d'études.

#### 6 | POSSIBILITÉS DE COLLABORATION

Nous pouvons partager nos divers résultats d'expériences avec des ballons de football.

Pour partager vos résultats, téléchargez le fichier et suivez les instructions<sup>[1]</sup>.

Nous sommes certains que les élèves peuvent échanger des idées concernant les différentes méthodes de mesure ou leurs appareils d'expérimentation. Ils peuvent concevoir d'autres expériences avec un ballon : par exemple, filmer la déformation du ballon lors du contact avec le sol et l'effet de la pression sur ce processus.

#### RÉFÉRENCES

<sup>[1]</sup> [www.science-on-stage.de/iStage3\\_materials](http://www.science-on-stage.de/iStage3_materials)





# IMPRINT

## TAKEN FROM

iStage 3 - Football in Science Teaching  
available in Czech, English, French, German,  
Hungarian, Polish, Spanish, Swedish  
[www.science-on-stage.eu/istage3](http://www.science-on-stage.eu/istage3)

## PUBLISHED BY

Science on Stage Deutschland e.V.  
Poststraße 4/5  
10178 Berlin · Germany

## REVISION AND TRANSLATION

TransForm Gesellschaft für Sprachen- und Mediendienste mbH  
[www.transformcologne.de](http://www.transformcologne.de)

## CREDITS

The authors have checked all aspects of copyright for the images and texts used in this publication to the best of their knowledge.

## DESIGN

WEBERSUPIRAN.berlin

## ILLUSTRATION

Tricom Kommunikation und Verlag GmbH  
[www.tricom-agentur.de](http://www.tricom-agentur.de)

## PLEASE ORDER FROM

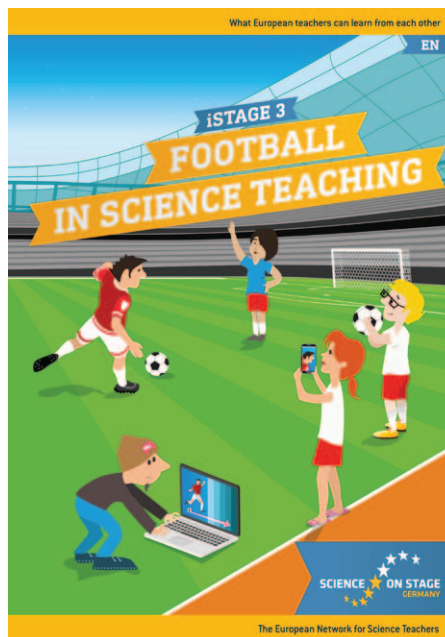
[www.science-on-stage.de](http://www.science-on-stage.de)  
[info@science-on-stage.de](mailto:info@science-on-stage.de)

Creative-Commons-License: Attribution Non-Commercial  
Share Alike



First edition published in 2016

© Science on Stage Deutschland e.V.



## SCIENCE ON STAGE – THE EUROPEAN NETWORK FOR SCIENCE TEACHERS

- ... is a network of and for science, technology, engineering and mathematics (STEM) teachers of all school levels.
- ... provides a European platform for the exchange of teaching ideas.
- ... highlights the importance of science and technology in schools and among the public.

The main supporter of Science on Stage is the Federation of German Employers' Associations in the Metal and Electrical Engineering Industries (GESAMTMETALL) with its initiative think ING.

Join in - find your country on

**[WWW.SCIENCE-ON-STAGE.EU](http://WWW.SCIENCE-ON-STAGE.EU)**

 [www.facebook.com/scienceonstageeurope](http://www.facebook.com/scienceonstageeurope)

 [www.twitter.com/ScienceOnStage](http://www.twitter.com/ScienceOnStage)

Subscribe for our newsletter:

 [www.science-on-stage.eu/newsletter](http://www.science-on-stage.eu/newsletter)



MAIN SUPPORTER OF  
SCIENCE ON STAGE GERMANY

think  
**ING.**  
Die Initiative für  
Ingenieur Nachwuchs

Proudly supported by

