

Unterrichtseinheiten zum Thema Druck, Atmung und Blutkreislauf

Die bisher durchgeführten Untersuchungen über Lernschwierigkeiten mit dem Druckbegriff und die Diskussion in den letzten Jahren haben zu einem weitgehenden Konsens geführt, den Druck bei Gasen einzuführen und nicht mit dem Auflagedruck zu beginnen. Unser Vorschlag schließt sich dieser Auffassung an. Er versucht von Anfang an als grundlegende Vorstellung zu vermitteln, dass jedes Gas unter Druck steht und damit stets das Bestreben hat, sich auszu dehnen (auch dann, wenn der Anfangsdruck kleiner als der Normalluftdruck ist).

Zusammenhänge zur Biologie und Medizin werden in den Unterricht so früh und so umfassend wie es möglich und für die Interessensverbesserung im Physikunterricht sinnvoll ist herangezogen.

I. Unterrichtseinheit zum Thema Druck in Gasen

Die Schüler sollen durch einfache Versuche, die sie zu einem großen Teil in einem Lernzirkel oder in üblichen Schülerversuchen selbst durchführen, zum Thema hingeführt und mit grundlegenden Eigenschaften des Drucks in Gasen vertraut werden.

Schritt 1: Das Ausdehnungsbestreben von Gasen

Als Einstiegsversuch ist der folgende Versuch gut geeignet. In einen Kolbenprober werden etwa 5 cm^3 einer gut schäumende Seifenlösung (Geschirrspülmittel und Wasser) eingefüllt, der Kolben etwa $1/3$ bis zur Hälfte herausgezogen und dann solange geschüttelt, bis dieses Volumen mit dichtem Schaum gefüllt ist. Ein zweiter bereitliegender Kolbenprober mit – zunächst geschlossenem - Hahn und einem Schlauchstück wird mit dem ersten verbunden. Der zweite ist zunächst vollständig eingeschoben (s. Bild 1a). Zieht man nun diesen Kolben heraus, entsteht bei geschlossenem Hahn nahezu ein Vakuum. Öffnet man dann den Hahn, wird der Schaum sichtbar auch in den leeren Kolbenprober gedrückt (s. Bild 1b). Es gelingt zwar nicht, den Schaum völlig gleichmäßig auf das gesamte ihm in beiden Kolbenprobern zur Verfügung stehende Volumen zu verteilen. Zur Demonstration des Prinzips reicht der Versuch aber aus. Deutlich zu sehen ist der Effekt, wenn die Kolbenprober auf einer durchsichtigen Folie auf dem Tageslichtprojektor liegen.

Nach dem Schließen des Hahns lassen sich beide Kolbenprober nicht zusammendrücken, auch wenn der Schaum zerfallen ist: es gibt einen federnden Widerstand auf beiden Seiten. Folglich ist jetzt Luft in beiden Kolbenprobern enthalten.

Vor der Durchführung wird im Gespräch darauf hingewiesen, dass die Seifenblasen nur dazu dienen, die Luftbewegung deutlich zu machen und dass nach Herausziehen des zweiten Kolbens in diesem praktisch keine Luft enthalten ist.



Bild 1a, b: Fotos der Versuchsanordnung zur Demonstration des Ausdehnungsbestrebens von Gasen.

Dieser Versuch soll zunächst als Demonstration des allgemeinen Prinzips genügen, das in dem folgenden Merksatz formuliert wird. Gleichzeitig wird die Bezeichnung Druck eingeführt.

Merksatz 1: Gase nehmen das gesamte ihnen zur Verfügung stehende Volumen ein. Gase haben immer das Bestreben, sich so weit wie möglich gleichmäßig auszudehnen.
Man sagt, in dem Gas herrscht ein Druck. Dieser zeigt sich z.B. darin, dass ein in ein Gefäß eingeschlossenes Gas gegen die Gefäßwände drückt.

Hinweis: Zigarettenrauchteilchen strömen weniger schnell als die Luftmoleküle durch das enge Verbindungsrohr, so dass sehr deutliche Dichteunterschiede der Rauchteilchen bestehen bleiben. Auch der Versuch mit sublimiertem Joddampf ergab keine befriedigende Demonstration.

Schritt 2: Die Entstehung des Drucks im Teilchenmodell

Die Lehrkraft beschreibt nun im Rahmen einer einfachen kinetischen Gastheorie die Auswirkung der Stöße der Gasteilchen auf die Begrenzungswände: ohne Widerstände würden die Wände nach außen verschoben werden. Das Teilchenmodell beschreibt auch angemessen die Ausdehnung der Luft in den nahezu freien Raum im Versuch in Schritt 1.

Schritt 3: Lernzirkel zu verschiedenen Aspekten des Druckes bei Gasen

Die folgende Zusammenstellung von einfachen Versuchen kann gut in einem Lernzirkel durchgeführt werden. Die dabei gemachten Erfahrungen dienen als Grundlage für die anschließende Diskussion und Formulierung allgemeiner Aussagen.

Damit die Schülerinnen und Schüler eine gewisse Vorstellung des Luftdrucks bekommen, empfiehlt es sich, alle an Station 1 anfangen zu lassen. Da dann nur vier Stationen bleiben, die in beliebiger Reihenfolge durchlaufen werden, sollten jede dieser Stationen zweimal aufgebaut sein.

Station 1 (Textstation):

Der Text dieser Station soll den Luftdruck als Schweredruck einführen. In

Station 2

erfolgt der Nachweis der Druckabnahmen mit wachsender Höhe mit einem einfachen Manometer.

Station 3:

In Station 3 sollen weitere Erfahrungen mit Auswirkungen des Luftdrucks gemacht werden.

Station 4:

Diese Station enthält Aufgaben zum Druckgleichgewicht und Druckausgleich.

Station 5:

Hier wird der quantitative Betrag des Luftdrucks bestimmt und anhand eines Textes der Versuch mit den Magdeburger Halbkugeln beschrieben.

Schritt 4: Auswertung der Arbeit an den Lernstationen und Formulierung weiterer Merksätze

Im Rahmen der Zusammenfassung der Ergebnisse kann noch auf folgende Fragestellung eingegangen werden:

Der Kolben eines Kolbenprobers mit Absperrhahn wird halb herausgezogen und dann der Hahn geschlossen. Wie groß ist der Druck in der eingeschlossenen Luft im Vergleich zu dem Druck der umgebenden Luft?

Als Ergebnis einer ausführlichen Diskussion der Stationenarbeit sollten sinngemäß folgende Merksätze formuliert worden sein:

Merksatz 2: Der Luftdruck in unserer Atmosphäre entsteht durch die Gewichtskraft, die die Erde auf die Luft ausübt. Auf die Luft unmittelbar an der Erdoberfläche lasten mehr Luftschichten als weiter oben. Der Luftdruck in der Atmosphäre ist ein Schweredruck.

Merksatz 3: Aufgrund ihres Ausdehnungsbestrebens üben Gase Kräfte auf begrenzende Flächen (reale oder gedachte) aus.

Merksatz 4: Gase dehnen sich von Gebieten höheren Druckes zu Gebieten mit niedrigem Druck aus. Diese Ausdehnung erfolgt solange, bis ein Druckausgleich erfolgt ist. Dann ist der Druck auf den beiden Seiten einer Trennfläche gleich groß.

Schritt 5: Quantitative Einführung der Definition des Drucks

Bild 2 zeigt die vorgeschlagene Anordnung zur Erarbeitung der Definition des Drucks. Sie unterscheidet sich von der herkömmlichen Anordnung lediglich durch die verwendeten Druckkraftmesser.

Der Versuch wird dann im klassischen Sinne durchgeführt, indem die Querschnittsflächen der Kolben und die Kräfte auf die Kolben gemessen werden.
 Folgende Fragestellungen können zur Druckdefinition hinführen:

Die Luft in beiden Kolbenprobern ist durch die Druckfedern etwas zusammengepresst. Warum ist der dadurch entstehende Druck auf beiden Seiten gleich groß?

Ist im Gleichgewichtszustand die Kraft, mit der die Luft im Kolbenprober 1 auf die Kolbenunterseite drückt dem Betrage nach gleich der Federkraft F_1 ?

Ist der Quotient F/A (Kraft durch Fläche, auf die die Kraft wirkt) eine sinnvolle Festlegung für die Stärke des Drucks im Gas? Gehe bei deinen Überlegungen davon aus, dass der Druck in beiden Kolben gleich groß ist.



Bild 2

Zur Vertiefung des Verständnisses eignet sich folgender Versuch, der in Bild 3 dargestellt ist. Man benötigt dazu eine Dose mit ebener Oberseite und Rand. In die Oberseite werden drei Löcher gebohrt, das mittlere hat einen größeren Durchmesser als die anderen beiden. In die beiden Längsseiten wird je ein Loch gebohrt, in das der Schlauch mit angeschlossener Handpumpe gut hinein passt. Man benötigt noch einen Stöpsel, um das zweite Loch zu verschließen. Dann müssen noch drei gleich große Deckel gefunden werden und ein vierter, der einen deutlich größeren Durchmesser, aber ungefähr die gleiche Masse hat, wie die anderen. Auf der Oberseite der Dose befindet sich ein wenig Wasser. Dadurch gibt es einen luftdichten Abschluss.

Die Schülerinnen und Schüler können nun Vermutungen anstellen, was passieren wird, z.B. ob sich der linke Deckel später hebt, wenn man von der rechten Seite Luft in den Behälter pumpt, oder ob sich der mittlere eher hebt, weil die Bohrung größer ist. Anspruchsvoller ist die Frage, ob sich der Deckel mit größerem Durchmesser eher hebt. Für die theoretische Betrachtung wird die resultierende Kraft aus Druck- und Gewichtskraft aufgestellt (p_u : Druck im Behälter, p_L : Außenluftdruck):

$$F_{\text{res}} = (p_u - p_L)A_1 - mg \text{ (Kräfte nach oben erhalten ein positives Vorzeichen).}$$

Durch Vergrößern der Fläche A ($A_2 > A_1$) vergrößert sich auch die Druckkraft und damit die resultierende Kraft:

$$(p_u - p_L)A_1 - mg < (p_u - p_L)A_2 - mg$$

Damit ist zu erwarten, dass sich der Deckel mit größerem Querschnitt eher hebt.



Bild 3

Materialangaben zur Vorbereitung des Lernzirkels:

Station 1

Hier muss lediglich der Text bereit gelegt werden.

Station 2

Um den Nachweis der Druckabnahme mit wachsender Höhe zu zeigen, benötigt man ein isoliertes Gefäß, z.B. eine Thermoskanne, mit einem angeschlossenen U-Rohr-Manometer. Dabei ist darauf zu achten, dass das Volumen des Gefäßes nicht zu klein ist, um die Druckänderung am Manometer gut sichtbar zu machen.

Dafür eignet sich z.B. ein Glasgefäß mit ca. 5 l Inhalt, das isoliert wird. Als Manometer reicht auch ein U-förmig gebogener Schlauch. (vgl. Abb. bei der Anleitung zu Station 2)

Station 3

In mehreren kleinen Experimenten werden verschiedene Auswirkungen des Luftdrucks behandelt.

- a) Man benötigt eine Flasche, einen Trichter, einen Korke mit zentraler Bohrung, in die der Trichter passt, und Wasser.
- b) Hier wird ein Plastikhandschuh, ein Gummiring und ein Glas, über das sich der Handschuh gerade noch gut ziehen lässt, gebraucht.
- c) In eine leere Milhdose werden zwei Löcher gebohrt. Man muss etwas Wasser und Isolierband oder Tesafilm bereitstellen.

Als Alternative zu diesem Versuch kann man auch eine Vogeltränke aufstellen und die Schülerinnen und Schüler versuchen lassen, deren Funktionsweise zu erklären

Station 4

Um den Luftballon in die Flasche zu bekommen, benötigt man eine Plastikflasche, in deren Boden man ein Loch bohrt, etwas Plastilin oder einen passenden Stöpsel, Spülmittel und Luftballons.

Das Marmeladenglas für den Versuch mit dem Mohrenkopf darf nicht viel größer als der Mohrenkopf sein. Zum Abpumpen der Luft kann man entweder einen Kolbenprober, oder einen Strohhalm im Deckel des Marmeladenglases anschließen. In beiden Fällen wird das Loch mit etwas Plastilin abgedichtet. Bei der Variante mit dem Kolbenprober empfiehlt sich eine Schlauchverbindung zwischen Deckel und Kolbenprober. (Abbildungen finden Sie auf der Anleitung zu Station 4)

Station 5

Der Text zur Beschreibung des Versuchs mit den Magdeburger Halbkugeln muss in genügender Anzahl kopiert werden.

Um die Kraft zu messen, die nötig ist, um den Kolben aus dem verschlossenen Kolbenprober zu ziehen, benötigen Sie neben dem Kolbenprober mit Absperrhahn und dem Kraftmesser noch eine geeignete Befestigung für den Kraftmesser.

STATION 1

An dieser Station findest du einen Text über die Entstehung des Luftdrucks.

Schreibe in dein Heft die Überschrift: Die Entstehung des Luftdrucks.

Lies den Text an dieser Station aufmerksam durch und beantworte dann die folgenden Fragen in deinem Heft!

- a) Wie du bereits weißt, dehnen sich Gase aus und nehmen stets das gesamte ihnen zur Verfügung stehende Volumen ein. Warum sind wir dann von Luft umgeben, wenn ihr doch praktisch der gesamte, riesige Weltraum zum Ausdehnen zur Verfügung steht?
- b) Welche Art von Druck ist der Luftdruck?
- c) Beschreibe mit eigenen Worten, warum der Luftdruck mit wachsender Höhe abnimmt!

Der Luftdruck

Die Gewichtskraft der Luft und die Anziehungskraft der Erde sind dafür verantwortlich, dass die Erde von einer Lufthülle umgeben ist. Die Anziehungskraft der Erde sorgt wie bei einem hochgeworfenen Stein dafür, dass die von der Erde wegfliegenden Gasteilchen wieder zurückkehren und nicht in das Weltall hinausfliegen.

An der Erdoberfläche ist der Luftdruck am größten. Je höher man steigt, desto geringer wird der Druck, die Luft wird dünner. Beim Besteigen sehr hoher Berge (über 5000 m) benötigt man Atemgeräte, da sich durch die Druckabnahme bei zunehmender Höhe zu wenig Sauerstoffmoleküle in der eingeatmeten Luft befinden. In einer Höhe von ca. 5500 m ist der Druck nur noch halb so groß wie auf Meereshöhe. Da sich die Luft zusammenpressen lässt, ist die Druckabnahme nicht direkt proportional zur Höhe.

Was ist die Ursache dafür, dass der Druck mit wachsender Höhe sinkt?

Blaise Pascal (1623 – 1662) verwendete folgendes Modell zur Erklärung:

„So wie ein großer Haufen Wolle, die man 20 oder 30 Klafter hoch aufeinander schichtet, durch sein eigenes Gewicht zusammengedrückt würde und die Wolle am Boden unten, weil eine größere Menge Wolle auf sie drückt, mehr zusammengedrückt würde als jene in der Mitte oder gegen oben, so wird die Luftmasse, die auch ein Gewicht hat und zusammengedrückt werden kann wie die Wolle, durch ihr eigenes Gewicht zusammengedrückt; und die Luft, die unten ist, das heißt an den tiefergelegenen Orten, wird viel mehr zusammengedrückt als jene, die höher liegt, auf den Bergen etwa, weil sie von einer größeren Luftmenge belastet wird.

Nähme man aus dieser Masse eine Handvoll Wolle von unten, so gepresst, wie man sie vorfindet, und trüge man sie, immer gleich stark gepresst haltend, in die Mitte dieser Masse, so würde sie sich von selbst ausdehnen, da sie nun, dem oberen Teil näher, eine geringere Menge Wolle zu tragen hätte.“

Der Druck in der Luft entsteht also durch die Gewichtskraft, man spricht auch von der Schwere der Luft. Der Luftdruck ist also ein Schweredruck.

STATION 2

An dieser Station findest du eine Thermoskanne, bzw. ein isoliertes Glasgefäß mit angeschlossenem Manometer und einen Folienstift. (Ein Manometer ist ein Gerät, das Druckunterschiede anzeigt.)



Isoliertes Gefäß mit angeschlossenem Manometer

Nimm die Thermoskanne mit dem Manometer, gehe damit in das Erdgeschoss – oder noch besser in den Keller - und markiere mit dem Folienstift die Höhe der Flüssigkeitssäule auf dem Manometer. Gehe nun die Treppe hoch bis ins oberste Stockwerk, beobachte den Flüssigkeitsstand während des Hinaufsteigens und markiere ihn wenn du oben bist.

Welche Beobachtung hast du gemacht?

Wische die Markierung des Folienstiftes wieder ab.

Notiere in deinem Heft die Überschrift:

Treppensteigen mit dem Manometer

- Skizziere den Versuchsaufbau und erkläre seine Funktionsweise!
- Beschreibe deine Beobachtung, die du beim Treppensteigen gemacht hast und gib eine Erklärung!
- Weshalb wird eine Thermoskanne und nicht eine gewöhnliche Glasflasche verwendet?

STATION 3

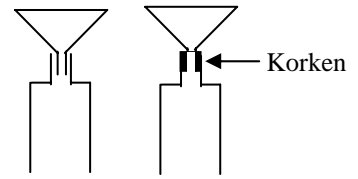
a) Der Trichter auf der Flasche

Stecke den Trichter in die Flasche und gieße etwas Wasser in den Trichter: Was beobachtest du?

Stecke nun den Trichter in den Korken, drücke diesen leicht in den Flaschenhals und gieße wieder etwas Wasser in den Trichter.

Notiere deine Beobachtungen und versuche eine kurze physikalische Erklärung.

Überschrift: *Der Trichter auf der Flasche*



b) Der Handschuh im Glas

Ziehe den Gummihandschuh über den Rand des Glases, so dass er nach außen hängt. Stecke ihn dann in das Glas. Was beobachtest du?

Stecke ihn nun zuerst in das Glas und ziehe ihn dann über den Rand. Stecke deine Hand ein Stück in den Handschuh hinein und ziehe ihn heraus.

Was beobachtest du?

Kannst du deine Beobachtung erklären?

Notiere die Antworten zu diesen Fragen unter *Der Handschuh im Glas*



In das Glas eingesteckter Handschuh

c) Die Milchdose

Fülle die leere Milchdose etwa halbvoll mit Wasser. Gieße etwas Wasser aus, wenn beide Öffnungen frei sind. Klebe nun eine der Öffnung zu und gieße wieder etwas Wasser aus.

Notiere deine Beobachtungen und versuche sie zu erklären!

Überschrift: *Die Milchdose*

STATION 4

Übernimm folgende Überschrift in dein Heft (die Hauptüberschrift folgt später):

Der Luftballon in der Flasche

Hierzu findest du eine Flasche mit einem Loch im Boden, einen Stöpsel, einen Luftballon und Spülmittel. Führe die folgenden Versuche durch und beantworte die Fragen.

- Verschließe das Loch am Flaschenboden mit dem Stöpsel. Reibe den Luftballon außen mit etwas Seifenwasser ein. Hänge den Luftballon in die Flasche und ziehe das Mundstück über den Flaschenhals. Blase nun den Luftballon auf.
Was stellst du dabei fest?
- Ziehe nun den Stöpsel wieder heraus und versuche erneut den Luftballon aufzublasen.
Welche Beobachtung hast du nun gemacht?
- Setze, nachdem du den Luftballon aufgeblasen hast, den Stöpsel wieder in das Loch am Flaschenboden.
Was stellst du fest?



Zur Beantwortung der Fragen schreibe folgende Überschriften in dein Heft:

Der Luftballon in der Flasche

Die Antworten könnten so aussehen:

Versucht man einen Luftballon aufzublasen, der über einen Flaschenhals gezogen ist, so stellt man fest, dass

Die Ursache dafür ist

Hat die Flasche jedoch ein Loch, so

Dies ist möglich, weil

Schließt man das Loch nachdem der Ballon aufgeblasen wurde, so

Dies liegt daran, dass

Der Mohrenkopf im Marmeladenglas

An dieser Station findest du ein Marmeladenglas, in dessen Deckel ein Loch gebohrt ist, einen Kolbenprober mit Schlauchverbindung und einen Mohrenkopf.

Lege den Mohrenkopf in das Marmeladenglas. Setze den Deckel mit dem angeschlossenen Kolbenprober auf das Marmeladenglas und ziehe rasch den Kolben heraus.

Was passiert mit dem Mohrenkopf?

Wie lässt sich das erklären?

Schreibe deine Antwort unter die Überschrift

Der Mohrenkopf im Marmeladenglas



Mache einen Vorschlag für die Überschrift zu Station 4.

STATION 4

Übernimm folgende Überschrift in dein Heft (die Hauptüberschrift folgt später):

Der Luftballon in der Flasche

Hierzu findest du eine Flasche mit einem Loch im Boden, einen Stöpsel, einen Luftballon und Spülmittel. Führe die folgenden Versuche durch und beantworte die Fragen.

- d) Verschließe das Loch am Flaschenboden mit dem Stöpsel. Reibe den Luftballon außen mit etwas Seifenwasser ein. Hänge den Luftballon in die Flasche und ziehe das Mundstück über den Flaschenhals. Blase nun den Luftballon auf.
Was stellst du dabei fest?
- e) Ziehe nun den Stöpsel wieder heraus und versuche erneut den Luftballon aufzublasen.
Welche Beobachtung hast du gemacht?
- f) Setze, nachdem du den Luftballon aufgeblasen hast, den Stöpsel wieder in das Loch am Flaschenboden.
Was stellst du fest?



Zur Beantwortung der Fragen schreibe folgende Überschriften in dein Heft:

Der Luftballon in der Flasche

Die Antworten könnten so aussehen:

Versucht man einen Luftballon aufzublasen, der über einen Flaschenhals gezogen ist, so stellt man fest, dass

Die Ursache dafür ist

Hat die Flasche jedoch ein Loch, so

Dies ist möglich, weil

Schließt man das Loch nachdem der Ballon aufgeblasen wurde, so

Dies liegt daran, dass

Der Mohrenkopf im Marmeladenglas

An dieser Station findest du ein Marmeladenglas, in dessen Deckel ein Loch gebohrt ist, einen Strohhalm, Plastilin und einen Mohrenkopf.

Lege den Mohrenkopf in das Marmeladenglas. Stecke den Strohhalm durch die Öffnung im Deckel, so dass der Strohhalm nur ganz wenig in das Marmeladenglas hineinragt und dichte das Loch im Deckel von beiden Seiten mit Plastilin ab. Setze nun den Deckel auf das Marmeladenglas und sauge die Luft heraus.

Achtung: Wenn du Luft holst, musst du das Ende des Strohhalms mit der Zunge verschließen.

Was passiert mit dem Mohrenkopf?

Wie lässt sich das erklären?

Schreibe deine Antwort unter die Überschrift

Der Mohrenkopf im Marmeladenglas

Mache einen Vorschlag für die Überschrift zu Station 4.

STATION 5

Historisches

Auf dem Textblatt zu dieser Station findest du die Beschreibung des historischen Versuchs zum Nachweis des Luftdrucks.

Lies den Text aufmerksam und beantworte folgende Fragen:

Warum schaffen es die Pferde nicht, die Halbkugeln voneinander zu trennen?

Warum glaubst du, waren die Zuschauer von diesem Versuch so überrascht?

Schreibe deine Antwort unter die Überschrift:

Nachweis des Luftdrucks: Die Magdeburger Halbkugeln

Versuche mit dem Kolbenprober

Neben dem Textblatt findest du an dieser Station einen Kolbenprober mit Hahn und einen Kraftmesser.

- Schiebe den Kolben ganz in den Kolbenprober hinein und verschließe den Hahn. Versuche nun den Kolben herauszuziehen.

Warum fällt das so schwer?

Was passiert, wenn du den Kolben wieder loslässt? Erkläre deine Beobachtung!

Halte dein Ergebnis unter der Überschrift

Versuch mit dem Kolbenprober

fest.

- Befestige nun den Kraftmesser am Kolben und bestimme die Kraft, die nötig ist um den Kolben herauszuziehen.



Foto mit Anordnung

Ergänze deine Erklärung, indem du folgenden Satz vervollständigst:

Eine Kraft von ist notwendig, um den Kolben aus dem verschlossenen Kolbenprober zu ziehen. Diese Kraft muss aufgebracht werden, um

Nachweis des Luftdrucks

Im Jahre 1654 war der Ingenieur Otto von Guericke Bürgermeister von Magdeburg. Ein Versuch mit zwei Halbkugeln versetzte seine Zuschauer in Staunen:

Die beiden Halbkugeln (Schalen) wurden mit einem Lederring als Dichtung zusammengelegt. Eine der Halbkugeln war mit einem Hahn verschließbar. Mit Hilfe einer Luftpumpe wurde die Luft aus der Kugel gepumpt. Dann wurden auf jede Seite der Kugel je zehn kräftige Pferde gespannt, um die beiden Kugelhälften auseinander zu reißen. Aber so sehr auch die Pferde angetrieben wurden, die Halbkugeln ließen sich nicht trennen. Eine übermächtige, für die Zuschauer unerklärliche Kraft schien die beiden Halbkugeln zusammen zu pressen. Als Guericke den Hahn öffnete, an dem vorher die Pumpe angeschlossen war, fielen die beiden Halbkugeln sofort auseinander.