

Negative Masse ist nicht gleich negative Masse [06. Mai]

Jeder von uns kennt die **Newtonschen Gesetze** [1] aus dem Physikunterricht. Im Grunde sagt eines der Gesetze aus, daß sich Objekte in der Art beschleunigen wie es ihnen von der auf sie einwirkenden Kraft vorgegeben wird. Da die Masse eines Objektes üblicherweise positiv ist, wirkt diese Beschleunigung in der gleichen Richtung wie die Kraft, die auf das Objekt einwirkt.

In manchen Situationen verläuft ein derartiges Experiment jedoch anders: dann scheint sich ein Objekt entgegen der Richtung der auf es einwirkenden Kraft zu beschleunigen.

Wissenschaft und die Presse

Internetartikel wie der der *BBC* [1] und andere, die über Ergebnisse wissenschaftlicher Experimente berichten, haben in der letzten Woche viel Verwirrung gestiftet (Abb. 1-3). Es kursieren Behauptungen, die **Expansion des Universums** [1] werde **durch negative Masse** [1] erzeugt. Hier einige negative Beispiele:



Abb. 1 Schlagzeile der BBC News vom 19. April.
„Physiker beobachten ‚negative Masse‘“
© BBC

Es stimmt ebenfalls nicht, daß die Entdeckung negativer Masse unsere Physik auf den Kopf stellt, wie der INDEPENDENT [1] behauptet (Abb. 2):



Abb. 2 Schlagzeile des INDEPENDENT vom 20. April.
„Wissenschaftler beobachten Flüssigkeit mit ‚negativer Masse‘,
die die Physik vollständig auf den Kopf stellt.“
© INDEPENDENT

Der Höhepunkt der unglaublichen Behauptungen im Zusammenhang mit der Entdeckung negativer Masse gipfelt im Hinweis auf *Schwarze Löcher* [1] des *The Telegraph* [1]:



Sämtliche dieser internationalen Artikelüberschriften beziehen sich auf einen **Fachartikel** [2], in dem von Ergebnissen eines Experiments berichtet wird, bei dem Physiker ein **Kondensat** [1] erzeugten, das sich verhielt als besitze es eine **negative effektive Masse** [1].

Negative Masse

Bis vor wenigen Jahren kannte man das Phänomen der negativen Masse lediglich als theoretisches Konzept, das nur unter sehr spezifischen Umständen auftritt. Ganz prinzipiell, aber nicht exakt zutreffend, könnte man positive und negative Masse mit einer *positiven und negativen Ladung* [1] vergleichen, wie man sie beispielsweise beim *Elektron* (negative Ladung, e^-) [1] und dem *Positron* (positive Ladung, e^+) kennt.

Was bedeutet „effektiv“?

Dabei tritt das Wort „effektive“ im Titel der Fachveröffentlichung überhaupt nicht in Erscheinung, jedoch ist es von grundlegender Bedeutung für das Verständnis des Experiments. In der Physik benutzt man dieses Adjektiv um zu betonen, daß etwas nicht fundamental ist, sondern vielmehr aus etwas heraustretend, innewohnend ist. Beispielsweise handelt es sich bei dem *effektiven Radius* [1] einer Galaxie nicht um ihren Radius, bei der *effektiven Kernladung* [1] nicht um die Ladung des (*Atom*)Kerns [1] und bei der effektiven negativen Masse nicht um die negative Masse.

Vielmehr handelt es sich bei der effektiven Masse um eine **mathematische Größe**, um das Verhalten einer Substanz im weitesten Sinne zu beschreiben. Die effektive Masse ist ebenfalls ungleich der (*relativistischen*) *Ruhemasse* [1].

ANALOGON

Stellen Sie sich vor, Sie lassen eine **Kugel auf den Boden fallen**. Mithilfe der fallenden Kugel kann die sog. *dynamische Härte* [1] des Bodenmaterials bestimmt werden. Dabei darf die für den Fall verwendete Masse der Kugel nicht mit dem Körpergewicht einer Per-

son gleichgesetzt werden; die Kugelmasse beschreibt lediglich die Masse der Körperteile (einer fallenden Person), die bei dem Kontakt mit dem Boden (nach dem Fall) nicht weiterlaufen kann, sondern abrupt abgebremst wird. Daher ist die effektive Masse wesentlich geringer als die, die man mit einer Waage messen würde; sie beträgt je nach der Situation des Aufpralls einer Person auf den Boden 5-40 Prozent der Körpermasse.

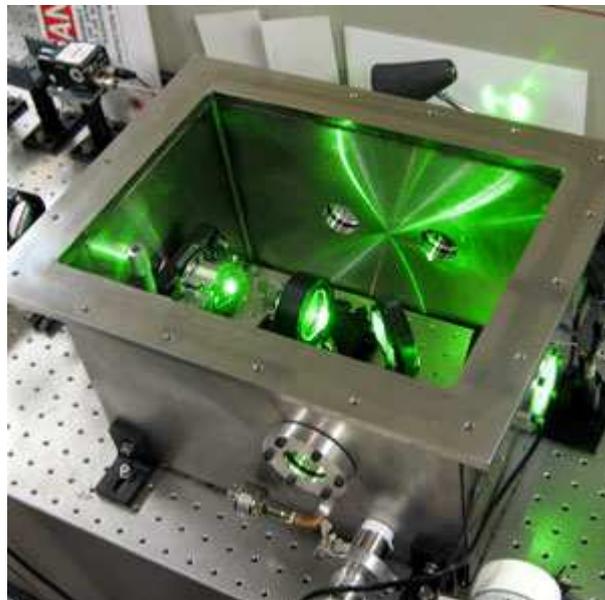
Das Experiment

Bei der im Fachartikel verwendeten Substanz handelt es sich um ein Kondensat bzw. eine stark abgekühlte (ultrakalte) Wolke, in der sich rund **10.000 ⁸⁷Rubidiumatome** [1] befinden. Dabei benutzen die Wissenschaftler *Laser* [1], um das Kondensat immer weiter abzukühlen (Abb. 4), und es heißen, hochenergetischen Teilchen erlauben aus der Wolke zu entkommen – wie Dampf; dadurch wurde das Kondensat stetig kälter (Abb. 5). Am Ende des Prozesses lag die Temperatur der Teilchenwolke knapp oberhalb des *absoluten Nullpunkts* [1] der Temperaturskala von 0 Kelvin [1] (-273 Grad Celsius).

Abb. 4
Versuchsaufbau eines Laserexperiments.

Experimente wie das Rubidiumatom-Experiment finden in Einrichtungen wie dem *Laser-Shock Laboratory* [1] statt. Dort nutzt man einen hochenergetischen, gepulsten *Nd-YAG-Laser* [1], um Pulse einer Dauer von rund 20 *Nanosekunden* [1] zu erzeugen und die betreffenden Teilchen sozusagen in einer Falle gefangen zu halten.

© <https://shock.wsu.edu>



Bei derartig niedrigen Temperaturen bezeichnet man ein derartiges Teilchensystem als **Bose-Einstein-Kondensat** [1]. *S. N. Bose* [1] und *A. Einstein* [1] sagten diesen Zustand bereits vor Jahrzehnten vorher: Bei derartig niedrigen Temperaturen bewegen sich die Teilchen extrem langsam (Abb. 5) und folgen den *Prinzipien der Quantenmechanik* [1]; sie verhalten sich dann eher wie *Wellen* [1]. Dabei synchronisiert sich das Teilchensystem sozusagen selbst und bewegt sich *unisono* (synchron) als *Supraflüssigkeit* [1] bzw. erscheint als ein einziges Teilchen, ohne bei seiner Bewegung Energie zu verlieren.





→ Abkühlung

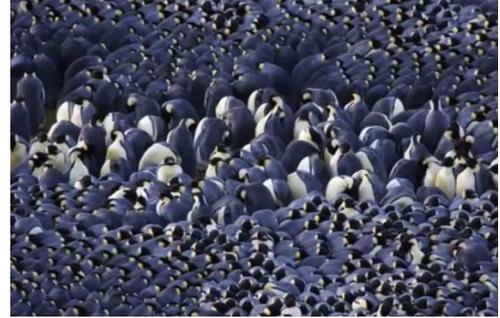


Abb. 5 Bewegung von Teilchen beim Abkühlen.

Kühlt man einen Behälter von warmen, sich schnell bewegenden Teilchen (rote Kreise, links oben) ab, verlangsamt sich die Bewegung dieser Teilchen (blaue Kreise, rechts oben). Je stärker die Abkühlung, desto mehr verlangsamt sich die Bewegung bzw. Geschwindigkeit der Teilchen, vergleichbar mit einer Gruppe von Pinguinen, die bei zunehmender Kälte immer mehr zusammenrückt (unten links und rechts).

© antarctica.gov

Anders gesagt: Die Laser trieben die Rubidiumatome sozusagen in eine winzige Falle (*Laserfalle* [1]), die nicht größer als ein Hundert *Mikrometer* [1] war. Dabei erreichten die Atome einen supraflüssigen Zustand. Zu diesem Zeitpunkt besaß das Kondensat eine **reguläre (positive) Masse.**



Abb. 6 Größtmögliche Dichte von Pinguinen.

In Analogie zur größtmöglichen Dichte von Teilchen, die mithilfe einer Laserfalle zusammengehalten werden, kann man sich eine Gruppe von Pinguinen vorstellen, die immer dichter zusammenrückt. Liegen die Pinguine bzw. die Teilchen dicht aufeinander (links) oder formieren sie sich unisono in einer dichtgepackten Gruppe (rechts)? Im Falle der Pinguine beträgt der Minimalabstand 2 Zentimeter.

© New Journal of Physics

Wie dicht die Teilchen zusammenrücken können, bestimmen die Gesetze der *Quantenmechanik* [1] (Abb. 6), im Falle der Pinguinengruppe beträgt der Wert 2 Zentimeter.

Physikalischer EXKURS

Bestimmung der effektiven Masse

Zur Bestimmung der effektiven Masse der Teilchen in der Wolke verwendet man die *Dispersionsrelation* [1], die einen Zusammenhang zwischen der Energie und dem *Drehimpuls* [1] des Kondensats herstellt (genauer gesagt: die 2. *Ableitung* [1] der Energie in Bezug auf den Impuls). Das Ergebnis wird als **inverse effektive Masse** [1] bezeichnet und kann negative Werte annehmen.

Trägt man die beteiligte Teilchenenergie gegenüber dem Impuls in ein Koordinatensystem (Abb. 5) ein, kann man die Regionen der negativen Werte der Masse aus der Krümmung der resultierenden Kurve ablesen. Im Beispiel der Veröffentlichung [2] entspricht der **rote** Pfeil der Region, in der die Werte der effektiven Masse negative Werte annehmen (Abb. 5).

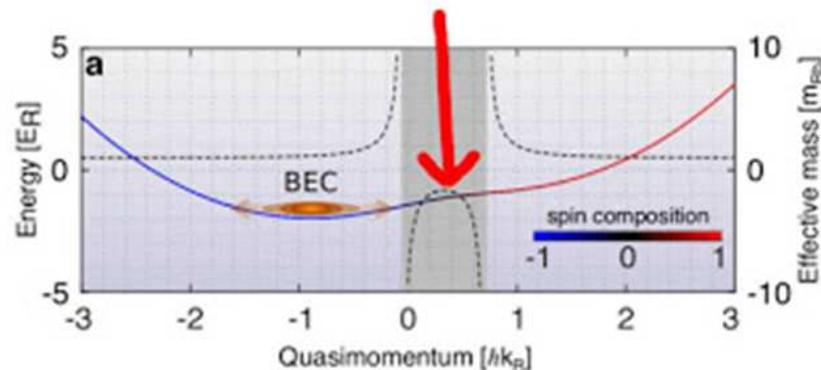


Abb. 5 Schematische Darstellung der 1-dimensionalen Expansion des Kondensats.

Die durchgezogene Kurve stellt die Relation zwischen der Energie (y-Achse, links), der effektiven Masse (y-Achse, rechts) und dem Drehimpuls (x-Achse) eines Teilchens dar. Handelt es sich bei der Kurve um eine Parabel, kann man die gesamte Energie des Teilchens als *kinetische Energie* [1] ansehen. Der entscheidende Faktor, der eine Aussage über die effektive Masse macht, ist die Krümmung der Dispersionskurve an den Extrema. Große Krümmungen weisen auf eine geringe effektive Masse, geringe Krümmungen auf einen großen Wert der effektiven Masse. –

Jedoch hat die effektive Masse nichts mit der realen Masse zu tun, sie ist ein mathematisches Konzept. Kennt man den Verlauf der Dispersionskurve, kann man der effektiven Masse einen Wert zuordnen und die Differenz zur realen Masse berechnen. Theoretisch macht die effektive Masse eine Aussage darüber, wie sich die betrachteten Teilchen im Vergleich zu *freien Teilchen im Gasmodell* [1] verhalten. – Die Asymmetrie der obigen Dispersionsrelation (durchgezogene Kurve) bewirkt eine asymmetrische Expansion des Kondensats, da dessen effektive Masse variiert. Die gestrichelten Linien zeigen auf den Wert der effektiven Masse. Die grau hinterlegte Region weist auf die Region der negativen effektiven Masse. Die **orangefarbene** Region bezeichnet die Lage des Kondensats (BEC = Bose-Einstein-Kondensat) im Laborexperiment.

© [2]

Manche Physiker sind der Ansicht der Ausdruck effektive Masse sei ein *historischer Artefakt* [1]. Die *Festkörperphysiker* [1] bezeichnen den Ausdruck als effektive Masse, weil im *nicht-relativistischen Fall* [1], also im Alltag, die Beziehung $Energie = Impuls^2 / Masse$ [1] gilt. Daraus läßt sich ein Ausdruck für die effektive Masse ableiten.

Praktisch gesehen erhält der Begriff negative Masse eine Bedeutung, wenn man ein Kondensat, das man mithilfe einer physikalischen Methode in einem bestimmten Raumbereich gefangenhält, plötzlich freiläßt (Abb. 6).

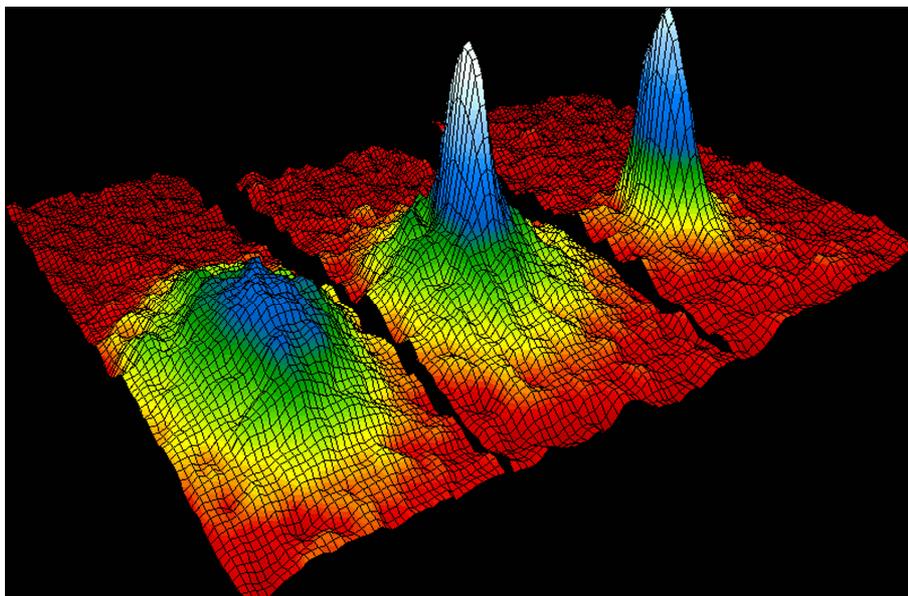


Abb. 6 Geschwindigkeitsverteilung eines Gases aus Rubidiumatomen.

Die Geschwindigkeitsverteilung eines Gases aus Rubidiumatomen bestätigt die Entdeckung einer neuen Materiephase, des Bose-Einstein-Kondensats (s. Abb. 7).

© NIST/JILA/CU-Boulder // [2]

Zum Erreichen des Zustands „negative Masse“ verwendeten die Forscher ein zweites Set von Lasern, die die Rubidiumatome hin und her trieben, sozusagen durchschüttelten, und ihren *Spin* [1] veränderten.

Was geschieht? Die Teilchen des Kondensats fliehen relativ schnell aus dem Raumbereich, weg von ihrem *Massezentrum* [1], um danach plötzlich nicht mehr weiter zu fliehen (Abb. 6, 7). Der Grund hierfür ist die sog. *Spin-Bahn-Kopplung* [1]. Die Teilchen verhalten sich als besäßen sie eine negative Masse. Jedes Mal, wenn ein Atom durch den Laser angekickt wird, bewegt es sich zurück (Abb. 7), vergleichbar mit dem Anstoßen an eine unsichtbare Wand (bei der Vorwärtsbewegung).

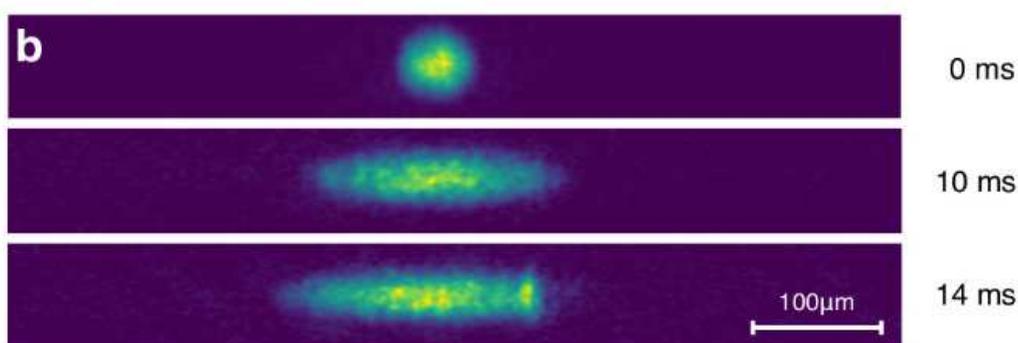


Abb. 7 Bewegung eines Gases aus Rubidiumatomen mit und ohne Laserfalle.

Die Abbildungen zeigen das Verhalten eines Bose-Einstein-Kondensats aus Rubidiumatomen (oben). Wenn das Kondensat aus der Laserfalle entlassen wird, breitet es sich zunächst zigarrenförmig aus (Mitte, 10 Millisekunden (ms)), um danach aufgrund der Spin-Bahn-Kopplung der Teilchen (mithilfe zweier Laser, die die Teilchen immer wieder anstoßen) wieder zurückzuprallen, vergleichbar mit einer unsichtbaren Wand (unten rechts, 14 ms). – Maßstab 100 Mikrometer (rechts). Die Teilchen verhalten sich als besäßen sie eine negative Masse, dabei handelt es sich jedoch um die negative effektive Masse der Teilchen.

© NIST/JILA/CU-Boulder // [2]

Man kann im Labor einen Zustand erzeugen, in dem sich Teilchen (in diesem Fall Atome) aufgrund der Änderung der Spin-Bahn-Kopplung verhalten als besäßen sie eine negative Masse.

Ergebnis

Die Fachpublikation [2] beschreibt im Prinzip dieses physikalische Experiment. Am Ende kämpft das Kondensat gegen eine verbliebende Kraft an, bei der es sich jedoch nicht um eine externe Kraft handelt. Diese Kraft stammt aus dem **Quantendruck** [1] der Flüssigkeit selbst. Bei dem Quantendruck handelt es sich um eine Art Druck, der jedoch sämtliche quantenmechanischen Einflüsse berücksichtigt.

Was geschieht: das Kondensat begrenzt seine Expansion selbst und zwar aufgrund von (langreichweitigen) Korrelationen, die von *Quanteneffekten* [1] stammen. Genau gesagt bedeutet dies jedoch nicht, daß die Physiker in dem Experiment negative Masse erzeugt haben und schon gar nicht, daß irgendeine Kraft die Teilchen des Kondensats zurückbeschleunigt haben.

Allerdings erzeugten die Forscher **negative effektive Masse**, nicht negative Masse.

Das Ergebnis des Experiments ist etwas ganz Besonderes: zuvor hatten zahlreiche Wissenschaftler im Labor versucht, genau diesen Zustand herzustellen, ohne Erfolg.

Nur wenige Medien haben korrekt berichtet. Vor allem hat nichts in dem Experiment etwas mit *Schwarzen Löchern* [1], *Dunkler Energie* [1] oder *Wurmlöchern* [1] zu tun. Die Physik, die wir kennen, gilt nach wie vor.

Falls Sie Fragen und Anregungen zu diesem Thema haben, schreiben Sie uns unter **kontakt@ig-hutzi-spechtler.eu**

Ihre
IG Hutzi Spechtler – Yasmin A. Walter (yahw/kam1)

Quellenangaben:

[1] Mehr Information über astronomische und physikalische Begriffe
www.wikipedia.de

[2]
Khomehchi, M. A., et al., *Phys. Rev. Lett.* **118**, 155301 (2017)
<https://news.wsu.edu>

[3] Mehr Information über das *Bose-Einstein-Kondensat*
<http://vdsmaza.com/view/video/shdLjIkRaS8/Bose-Einstein+condensation.html>
(MP4 wählen)