WIKIPEDIA
25 Jahre freie Enzyklopädie

Inhaltsverzeichnis

1 Massendefekt in der Kernphysik
1.1 Massendefekt bei verschiedenen Massenzahlen
1.2 Energiefreisetzung bei Spaltung und Fusion
1.3 Definition
1.4 Datensammlungen
2 Massendefekt beim Aufbau des Nukleons aus Quarks
3 Massendefekt in Atomphysik und Chemie
4 Massendefekt in der Astrophysik
5 Einzelnachweise

Massendefekt

Als **Massendefekt** (auch Massenverlust) bezeichnet man in der Kernphysik das Massenäquivalent der Bindungsenergie des Atomkerns.[1][2] Er äußert sich als Differenz zwischen der Summe der Massen aller Nukleonen (Protonen und Neutronen) und der tatsächlich gemessenen (stets kleineren) Masse des Kerns.

Man kann diesen Begriff auch bei atomaren oder chemischen Bindungen verwenden, dort ist der Massendefekt aber um viele Größenordnungen geringer. Auch in der Astrophysik treten Massendefekte auf.

Der Massendefekt ist messbar und widerlegt die als „Massenerhaltungssatz“ bekannte Annahme der klassischen Physik, die Masse eines Objekts/Systems sei die Summe der Massen seiner Bestandteile.

Massendefekt in der Kernphysik

Der Massendefekt ergibt sich aus der Äquivalenz von Masse und Energie $E_0 = mc^2$. Die Bindungsenergie der Nukleonen vermindert die Gesamtmasse, die sich als Summe der Massen der einzelnen Kernbausteine ergeben würde. Diese Massendifferenz Δm entspricht der bei der Entstehung des Atomkerns freigesetzten Bindungsenergie $E_\mathrm{B} = \Delta m\, c^2$. Je größer der Massendefekt pro Nukleon ist, desto stabiler ist der Atomkern, da mehr Energie zu seiner Zerlegung aufgewendet werden muss. Der Massendefekt ist stets positiv, sonst würde der Atomkern sich *instantan* in Nukleonen zerlegen.

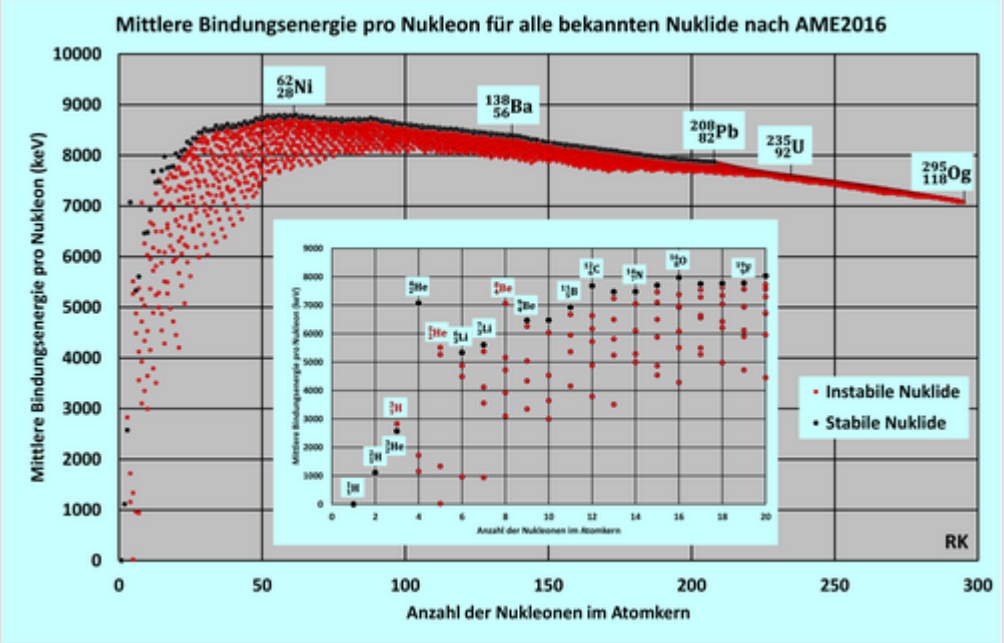
Der Begriff *Massendefekt* wurde 1927 von Francis William Aston eingeführt,[3] nachdem er ab 1919 als erster festgestellt hatte, dass Atomkerne leichter sind als ihre vermutlichen Bausteine zusammengenommen. Eine Arbeit, die in der Folge wesentlich zur Einigung von Chemikern und

Physikern auf eine gemeinsame atomare Masseneinheit im Jahr 1960 beitrug, war dabei Josef Mattauchs Artikel *Maßeinheiten für Atomgewichte und Nuklidenmassen*[4] aus dem Jahr 1958, der u. a. Details zur Geschichte des Begriffs „Massendefekt“ und mit ihm verwandter Größen enthielt.

Der Massendefekt (englisch *Mass defect, Mass deficiency*) darf nicht mit dem *Massenexzess* (englisch *Mass excess*), auch *Massenüberschuss* genannt, verwechselt werden.[5][6] Aus praktischen Gründen wurde eine atomare Masseneinheit u definiert, die der „typischen“ Kernmasse dividiert durch die Zahl A der Nukleonen entspricht, normiert auf das Nuklid ^{12}C. Der Massenexzess $\Delta = m_{\text{Kern}} - A\,\mathrm{u}$ ist die Abweichung von der als $A\,\mathrm{u}$ abgeschätzten Masse, also eine negative oder positive Hilfsgröße, die manche Berechnungen einfacher machen kann.

Massendefekt bei verschiedenen Massenzahlen

Der gesamte Massendefekt eines Kerns steigt mit der Nukleonenzahl, d. h. der Anzahl der enthaltenen Nukleonen. Gemessen wird er z. B. mittels Massenspektrometern. Wenn man daraus den *durchschnittlichen* Massendefekt pro Nukleon und damit die Bindungsenergie pro Nukleon (in der Einheit keV) berechnet, ergibt sich der im Bild gezeigte Zusammenhang mit der Massenzahl.



Mittlere Atomkernbindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Anzahl der Nukleonen im Atomkern für alle bekannten Nuklide. Schwarze Punkte: Natürlich vorkommende Kerne.

Die höchsten Massendefekte pro Nukleon finden sich bei Nukliden, deren Atomkern aus ungefähr 60 Nukleonen besteht. Eine ganze Reihe von Nukliden haben hier fast identische Werte. Das Nuklid mit dem höchsten durchschnittlichen Massendefekt pro Nukleon ist ^{62}Ni, gefolgt von den Eisenisotopen ^{58}Fe und ^{56}Fe.[7]

Eine einfache näherungsweise Erklärung der Abhängigkeit des Massendefekts von der Massenzahl und den Anteilen von Protonen und Neutronen wird im Tröpfchenmodell gegeben.

Energiefreisetzung bei Spaltung und Fusion

Wenn leichte Nuklide (in der Abbildung links vom Bindungsenergie-Maximum gelegen) durch Kernfusion (Kernverschmelzung) eine höhere Nukleonenzahl erreichen, dann erhöht sich der Massendefekt pro Nukleon; diese Abnahme der Masse entspricht gemäß $E_0 = mc^2$ der frei werdenden Energie. Umgekehrt setzen schwere Kerne (rechts vom Bindungsenergie-Maximum ab etwa A=90) Energie frei, wenn sie durch Kernspaltung in zwei oder mehr Kerne mittlerer Masse zerlegt werden. Eine Energie freisetzende Umwandlung erfolgt somit immer „in Richtung zum Maximum des Massendefektes bzw. der Bindungsenergie“, also mit ansteigender Kurve. Die größte Freisetzung von Bindungsenergie (pro Nukleon) erfolgt bei der Fusion von Wasserstoffisotopen zu Helium-4.

Definition

Der Massendefekt Δm_K eines Kerns der Masse m_K ist definiert[1][2] als

$$\Delta m_K = Z\, m_\mathrm{p} + N\, m_\mathrm{n} - m_K\ .$$

Dabei ist Z die Ordnungszahl (Anzahl der Protonen), N die Anzahl der Neutronen, m_p die Masse eines Protons und m_n die Masse eines Neutrons.

In guter Näherung kann der Massendefekt Δm_K auf halbempirischer Basis mittels der – auf dem Tröpfchenmodell beruhenden – Bethe-Weizsäcker-Formel berechnet werden.

In der Praxis wird der Massendefekt nicht für den isolierten Atomkern, sondern für das gesamte, ungeladene Atom des jeweiligen Nuklids angegeben, also für die Atommasse. Dies hat experimentelle Gründe: Vollständig ionisierte, also „nackte“ Atomkerne lassen sich nur schwer gewinnen und handhaben, weil sie mit ihrer hohen positiven elektrischen Ladung sofort Elektronen aus der Umgebung einfangen. Die genaue Messung ihrer Masse wäre daher kaum möglich, besonders bei schweren Elementen (Elementen hoher Ordnungszahl) mit ihrer entsprechend besonders hohen Ladung.

Deshalb wird der Massendefekt Δm_A eines neutralen Atoms in seinem nuklearen und elektronischen Grundzustand mit einer Masse m_A verwendet und definiert durch

$$\Delta m_\mathrm{A} = Z\, m(^1\mathrm{H}) + N\, m_\mathrm{n} - m_A\ .$$

Dabei bedeutet $m(^1\mathrm{H})$ die Masse eines neutralen Atoms des leichten Wasserstoffatoms. Diese Definition des Massendefekts über Bindungsenergien (“Total binding energy $[Z\,\mathrm{M}(^1\mathrm{H}) + N\,\mathrm{M}(^1\mathrm{n}) - M(A,Z)]$ in keV”[8]) ist seit 2018 maßgeblich.

Mit der Elektronenmasse m_e kann die Masse eines neutralen Atoms des leichten Wasserstoffatoms ausgedrückt werden als

$$m(^1\mathrm{H}) = m_\mathrm{p} + m_\mathrm{e} - \Delta m_e(^1\mathrm{H})\ .$$

Dabei ist $\Delta m_e(^1\mathrm{H})$ das Massenäquivalent der Bindungsenergie des Elektrons im Wasserstoffatom. Diese Bindungsenergie, auch Ionisierungsenergie genannt, ist genau bekannt (s. Rydberg-Energie = 13,605 eV bzw. Ionisierungsenergie vom Wasserstoff = 13,598 eV). Eine nukleare Bindungsenergie gibt es bei leichtem Wasserstoff als einem Element mit nur einem Nukleon, dem Proton, nicht.

Die Masse m_A eines neutralen Atoms ist

$$m_A = Z\,m_\mathrm{p} + N\,m_\mathrm{n} + Z \cdot m_\mathrm{e} - \Delta m_K - \Delta m_e,$$

mit Δm_e dem Massendefekt der Elektronenhülle, dem Massenäquivalent der Bindungsenergien aller Z Elektronen im Atom. Dieser ist, worauf eingangs schon hingewiesen wurde, sehr viel kleiner als der Massendefekt durch die nukleare Bindung Δm_K und wird oft vernachlässigt oder von der Messgenauigkeit noch nicht erfasst.[4]

Da sich die Massen der Elektronen wegheben, ergibt sich daraus der Zusammenhang zwischen dem Massendefekt des Atoms und dem Massendefekt des Atomkerns zu

$$\Delta m_A = \Delta m_K + \Delta m_e - Z\,\Delta m_e(^1\mathrm{H}).$$

Wird der nukleare Massendefekt Δm_K explizit benötigt, kann der Massendefekt der elektronischen Bindung Δm_e aus der im Artikel Atomhülle angegebenen Formel 2 näherungsweise berechnet werden. Der Index A wird beim Massendefekt meist weggelassen, so auch im folgenden Abschnitt. Wenn von *Massendefekt* ohne erläuternden Zusatz gesprochen wird, ist meist diese Größe $\Delta m \equiv \Delta m_A$ gemeint.

Datensammlungen

Das Atomic Mass Data Center (AMDC) veröffentlicht in regelmäßigen Intervallen die aktuellen Messwerte für Atommassen und verwandte Größen, die Atomic Mass Evaluation. Dabei werden Bindungsenergien pro Nukleon (*Binding energy per nucleon*) veröffentlicht, woraus man den Massendefekt durch Multiplikation mit der Anzahl A der Nukleonen und Division durch c^2 erhält.

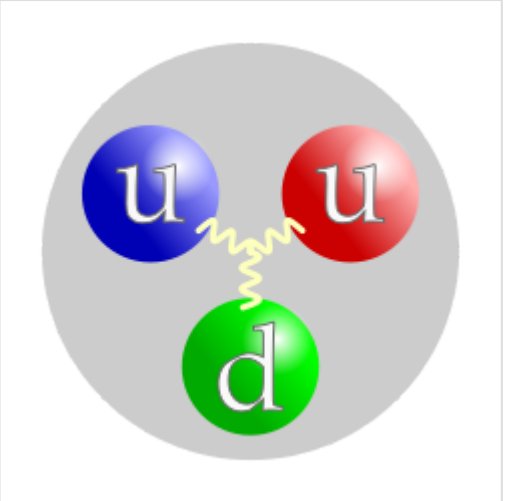
Die Liste der Naturkonstanten des CODATA enthält auch die Massen von Proton, Neutron, Deuteron (^{2}H-Kern), Triton (^{3}H-Kern), Helion (^{3}He-Kern) und Alpha-Teilchen (^{4}He-Kern).[9] Damit lassen sich die Massendefekte der Atomkerne mit A = 2, 3, 4 berechnen.

Massendefekt beim Aufbau des Nukleons aus Quarks

Vereinzelt wird der Begriff des Massendefekts auch auf den Aufbau des Nukleons aus Quarks bezogen, wo er jedoch nicht in gleicher Weise anwendbar ist. Der Begriff *Massendefekt* setzt voraus, dass ein Gebilde aus einer zahlenmäßig genau bestimmten Anzahl von Teilen besteht und deren Massen einzeln wohlbestimmte Größen sind. Diese Vorstellung ist in der klassischen Physik begründet und gilt auch in der nichtrelativistischen Quantenmechanik noch in guter Näherung. So wurde der Massendefekt an der Bindung der Nukleonen zu einem Atomkern entdeckt, sobald sich um 1920 die Vorstellung entwickelte, Kerne seien aus Bausteinen aufgebaut.

In der relativistischen Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie gilt diese Voraussetzung wohlbestimmter Teilchenzahlen jedoch nicht per se, allenfalls in guter Näherung im nichtrelativistischen Grenzfall. Der Grund ist die ständige Präsenz virtueller Paare von Teilchen und Antiteilchen in unbestimmbarer Anzahl, wie schon gegen 1930 kurz nach der Entdeckung der hier gültigen Dirac-Gleichung festgestellt wurde.[10] In der Atomphysik führen solche Vakuumfluktuationen nur zu winzigen Korrekturen an den mit nicht-relativistischen Gleichungen berechneten Größen. Die Verhältnisse innerhalb des Nukleons hingegen fallen in den hochrelativistischen Bereich, wo die virtuellen Quarks

(„Seequarks“) eine beherrschende Rolle spielen. Was feststeht, ist nicht die Gesamtzahl der Quarks und Antiquarks, sondern nur, dass die Quarks in einer Überzahl von 3 vorhanden sind. Die Ermittlung eines Massendefekts ist also unmöglich.



Die Masse des Protons ist deutlich größer als die Summe der Massen der Quarks

Massendefekt in Atomphysik und Chemie

Die elektromagnetische Wechselwirkung, die im Atom die Elektronen in der Atomhülle an den Atomkern bindet, ist um viele Größenordnungen schwächer als die Starke Wechselwirkung, die die Nukleonen im Atomkern bindet. Daher sind atomare Bindungsenergien erheblich geringer. Im Wasserstoffatom (Masse ≈ 1 u) ist das Elektron mit 13,6 eV gebunden, entsprechend einem Massendefekt von $1{,}4 \cdot 10^{-8}$ u. In schwereren Atomen wächst die Bindungsenergie des innersten Elektrons zwar mit Z^2, ist aber immer noch nur ein kleiner Bruchteil der Ruheenergie *(siehe Atomhülle → Bindungsenergie)*.

Noch geringer ist der Massendefekt, der entsteht, wenn Atome eine chemische Verbindung eingehen.[11] Beispielsweise sind zur Spaltung des Cl_2-Moleküls 244 kJ/mol (≙ 2,5 eV) erforderlich (siehe Photochlorierung). Der Massendefekt beträgt damit $2{,}7 \cdot 10^{-9}$ u, was winzig ist verglichen mit der Masse des Cl_2-Moleküls von 71 u (relative Änderung: $-3{,}8 \cdot 10^{-11}$). Den größten Massendefekt aus stabilen Ausgangsstoffen liefert die Reaktion $2\ H_2 + O_2 \rightarrow 2\ H_2O$ (rel. Änderung: $-1{,}77 \cdot 10^{-10}$).

Massendefekt in der Astrophysik

Massendefekte treten auch bei gravitativer Bindung auf, zum Beispiel bei der Bildung eines Sterns aus einer Gaswolke. Der relative Massendefekt ist dabei von der Größenordnung

$$\frac{\Delta M}{M} \approx \frac{R_\mathrm{S}}{R},$$

wobei R der Radius und R_S der Schwarzschild-Radius des Sterns ist. Bei der Sonne ist er von der Größenordnung 10^{-6}.[12]

Für Neutronensterne ist der relative Massendefekt um so größer, je massenreicher er ist:[13]

$$\frac{\Delta M}{M_\mathrm{NS}} \approx \begin{cases} 0{,}080\,\frac{M_\mathrm{NS}}{M_\odot} & \text{nicht rotierender NS} \\ 0{,}064\,\frac{M_\mathrm{NS}}{M_\odot} & \text{maximal rotierender NS,} \end{cases}$$

wobei $M_\odot$ die Sonnenmasse ist. Typischerweise liegt $M_\mathrm{NS}/M_\odot$ zwischen 1,2 und 2,4.

Einzelnachweise

1. Klaus Bethge, Gertrud Walter, Bernhard Wiedemann: *Kernphysik*. 2., aktualisierte und erw. Auflage. Springer, Berlin / Heidelberg 2001, ISBN 3-540-41444-4, S. 47 (XX, 402 S., eingeschränkte Vorschau (https://books.google.de/books?id=tUQhBgAAQBAJ&pg=PA47#v=onepage) in der Google-Buchsuche).
2. Wolfgang Demtröder: *Experimentalphysik 4: Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. 4. Auflage. Springer Spektrum, Berlin/Heidelberg 2014, ISBN 978-3-642-21476-9, S. 26 (XX, 534 S., eingeschränkte Vorschau (https://books.google.de/books?id=TDkjBAAAQBAJ&pg=PA26#v=onepage) in der Google-Buchsuche).
3. Francis William Aston: *Bakerian Lecture. A New Mass-Spectrograph and the Whole Number Rule*. In: *Proc. Roy. Soc.* A 115, 1927, S. 487–518, doi:10.1098/rspa.1927.0106 (https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0106).
4. Josef Mattauch: *Maßeinheiten für Atomgewichte und Nuklidenmassen.* In: *Zeitschrift für Naturforschung A.* 13, 1958, S. 572–596 (online (http://www.znaturforsch.com/aa/v13a/13a0572.pdf)). (PDF)
5. Eric B. Paul: *Nuclear and particle physics*. North-Holland, Amsterdam 1969, ISBN 0-7204-0146-1, S. 5 (englisch, XIV, 494 S., eingeschränkte Vorschau (https://books.google.de/books?id=5SF5AAAAIAAJ&pg=PA5&q=%22mass+defect%22#v=onepage) in der Google-Buchsuche). “The difference between the exact atomic mass of an isotope $M(A, Z)$ and its mass number A is called the *mass excess* or the *mass defect* $\Delta = M(A, Z) - A$.”
6. Harry Friedmann: *Einführung in die Kernphysik*. Wiley-VCH, Weinheim, Bergstr 2014, ISBN 978-3-527-41248-8, S. 97 (XII, 481 S., eingeschränkte Vorschau (https://books.google.de/books?id=Y-hpBgAAQBAJ&pg=PA97#v=onepage) in der Google-Buchsuche).
7. M. P. Fewell: *The atomic nuclide with the highest mean binding energy*. In: *American Journal of Physics*. Band 63, Nr. 7, 1995, S. 653–658, doi:10.1119/1.17828 (https://doi.org/10.1119/1.17828), bibcode:1995AmJPh..63..653F (https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1995AmJPh..63..653F) (englisch).
8. G. Audi, A. H. Wapstra: *The 1993 atomic mass evaluation: (I) Atomic mass table*. In: *Nuclear Physics A*. Band 565, Nr. 1, 1993, S. 1–65, doi:10.1016/0375-9474(93)90024-R (https://doi.org/10.1016/0375-9474%2893%2990024-R) (in2p3.fr (http://amdc.in2p3.fr/masstables/Ame1993/ame93.pdf#page17) [PDF; abgerufen am 30. September 2018] Definition von *Total binding energy* auf S. 17).
9. *CODATA List of fundamental physical constants.* (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Results?search_for=mass) Abgerufen am 25. November 2023.
10. Abraham Pais: *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*. Clarendon Press, Oxford 1986, S. 350.
11. Douglas C. Giancoli, Oliver Eibl: *Physik: Lehr- und Übungsbuch*. 3. Auflage. Pearson Studium, München 2010, ISBN 978-3-86894-023-7, S. 1251 (XXV, 1610 S., eingeschränkte Vorschau (https://books.google.de/books?id=blIf3HCpDy8C&pg=PA1251#v=onepage) in der Google-Buchsuche).
12. Roman Sexl, Hannelore Sexl: *Weiße Zwerge - Schwarze Löcher: Einführung in die relativistische Astrophysik*. vieweg studium, Braunschweig/Wiesbaden 1979, ISBN 3-528-17214-2, S. 44–45.
13. He Gao et al.: *Relation between gravitational mass and baryonic mass for non-rotating and rapidly rotating neutron stars*, Frontiers of Physics, 15, 24603 (2020) DOI:10.1007/s11467-019-0945-9

Abgerufen von „https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Massendefekt&oldid=269496553“