

V702

Aktivierung mit Neutronen

David Venker

david.venker@tu-dortmund.de

Nico Guth

nico.guth@tu-dortmund.de

Abgabe: 16.06.2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Halbwertszeit	3
2.2	Kernreaktionen mit Neutronen	3
2.3	Erzeugung niederenergetischer Neutronen	4
2.4	Untersuchung des Zerfalls instabiler Isotope	4
3	Durchführung	6
3.1	Bestimmung der Untergrundrate	6
3.2	Bestimmung der Halbwertszeit von Vanadium	6
3.3	Bestimmung der Halbwertszeit von Rhodium	6
4	Auswertung	7
4.1	Bestimmung der Untergrundrate	7
4.2	Bestimmung der Halbwertszeit von Vanadium	7
4.3	Bestimmung der Halbwertszeit von Rhodium	8
5	Diskussion	10
	Literatur	11

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll die Halbwertszeit der Zerfälle von mit Neutronen aktivierten Vanadium- und Rhodiumproben bestimmt werden.

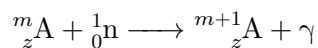
2 Theorie

2.1 Halbwertszeit

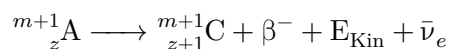
Atomkerne können unter Umständen sehr instabil werden. Variieren die Verhältnisse von Protonen und Neutronen zu sehr, kann es passieren, dass der Kern zerfällt. Dabei kann er entweder in einen stabilen Zustand zerfallen, oder in einen Zwischenzustand, der ebenfalls durch einen Zerfall in einen neuen Zustand übergeht. Es ist unmöglich zu sagen, wann genau dies bei einem einzelnen Atom passiert. Allerdings ist es möglich bei einer großen Anzahl an Kernen eine Aussage über die Anzahl der nicht zerfallenden Kerne zu treffen. Nachdem die sogenannte Halbwertszeit T verstrichen ist, sind noch die Hälfte der Kerne nicht zerfallen. Diese Größe kann je nach Kern über 23 Größenordnungen variieren. Um diesen Prozess und somit auch die Messung der Halbwertszeit zu verstehen, wird im Folgenden erklärt wie die instabilen Kerne genau funktionieren.

2.2 Kernreaktionen mit Neutronen

Die instabilen Kerne müssen zunächst erzeugt werden. Einige von ihnen zerfallen so schnell, dass sie optimalerweise kurz vor der Messung erzeugt werden. Dafür werden Neutronen auf stabile Kerne geschossen. Der Kern nimmt die kinetische Energie auf und verteilt sie auf seine Nukleonen. Es ist jetzt nicht möglich ein Nukleon abzustößen, also gibt der Kern ein Photon γ ab. Damit begibt er sich in seinen Grundzustand zurück.



Wegen des neuen Neutrons ist auch dieser Kern nicht dauerhaft stabil und zerfällt schließlich auch, dabei emittiert er ein Elektron und ein Antineutrino. Beide Teilchen teilen sich die Energie, die nach diesem Prozess überschüssig wäre.



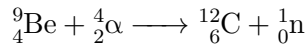
Ein weiterer wichtiger Begriff ist der Wirkungsquerschnitt σ . Dieser gibt eine Fläche an, in der jedes auf diese Fläche treffende Neutron eingefangen wird. Wird eine dünne Folie mit einer Fläche von 1 cm^2 mit der Dicke d und einer Anzahl Atome K pro cm^3 von n Neutronen pro Sekunde getroffen, ergibt sich der Wirkungsquerschnitt

$$\sigma = \frac{u}{n K d}. \quad (1)$$

Wobei u die Anzahl der Kerne ist, die tatsächlich einschlagen.

2.3 Erzeugung niederenergetischer Neutronen

Um niederenergetische Neutronen zu erzeugen werden andere Kernreaktionen dafür genutzt. In diesem Versuch wird die Reaktion



verwendet. Nach dieser Reaktion sind die Neutronen allerdings hochenergetisch, also werden sie gebremst. Es wird eine Aperlatur wie in Abbildung 1 verwendet. Dort werden die entstandenen Neutronen durch Paraffin geschickt, es besteht größtenteils aus Wasserstoff, dem idealen Stoßpartner für die Neutronen.

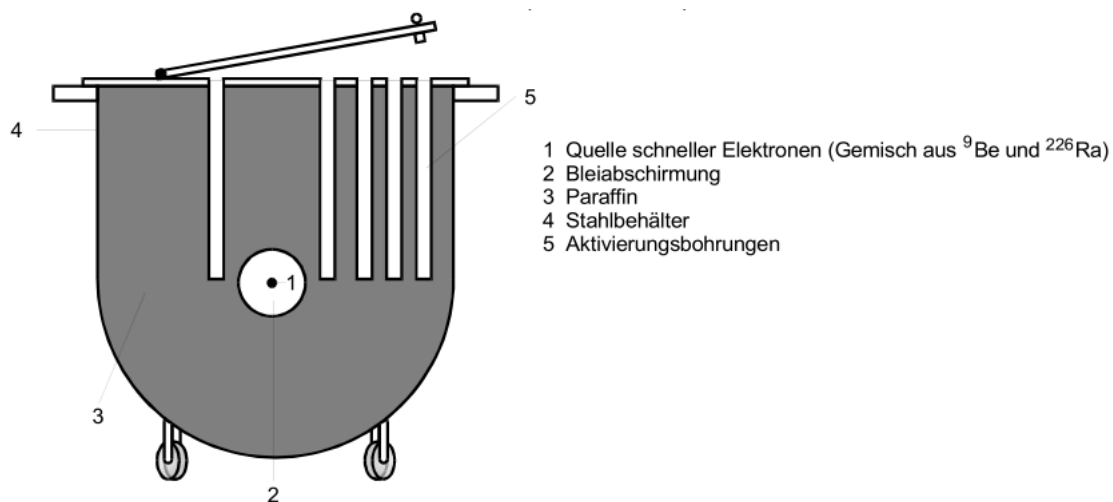
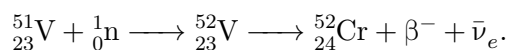


Abbildung 1: Querschnitt einer Quelle für thermische Neutronen.[1]

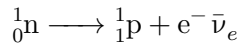
Bei einer Temperatur von 290 K besitzen sie dann noch eine Energie von etwa 0,025 eV. Neutronen mit so einer Energie werden thermische Neutronen genannt.

2.4 Untersuchung des Zerfalls instabiler Isotope

Die eigentliche Analyse der Isotope kann nun beginnen, im folgenden werden Vanadium und Rhodium Isotope betrachtet. Diese werden in die Aktivierungsschächte in Abbildung 1 gesteckt. Dort werden sie dann durch Neutronenbeschuss instabil und es wird der daraufhin auftretende Zerfall gemessen. Der Zerfall von Vanadium ist



Wegen des Neutronenüberschusses wandelt sich eines von ihnen in ein Proton, Elektron und ein Elektronen-Antineutrino um.



Dadurch entsteht das stabile Chrom. Dieser Zerfall wird über die Funktion

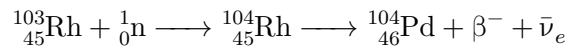
$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda T) \quad (2)$$

untersucht. N gibt die Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne an und N_0 die Anzahl der bei $t = 0$ vorliegenden Kerne. λ ist hier die Zerfallskonstante. Sie ist über die Halbwertszeit

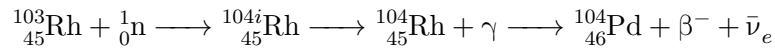
$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (3)$$

bestimmbar.

Rhodium zerfällt nicht nur auf eine Art, daher müssen hier zwei Fälle unterschieden werden. Zu 90% zerfällt es wie



Dies ist der erwünschte Zerfall, der auch gemessen werden soll. Es kann allerdings auch passieren, dass die Reaktion nach



verläuft. Dabei wird ein sogenannter isomerer Kern ${}^{104i}_{45}\text{Rh}$ gebildet, der ein Photon aussendet und dadurch in einen anderen Zustand übergeht. Dieser Vorgang beeinflusst die Messung des ersten Zerfalls, trägt man die Messung beider Zerfälle auf, sieht es in etwa so aus, wie in Abbildung 2.

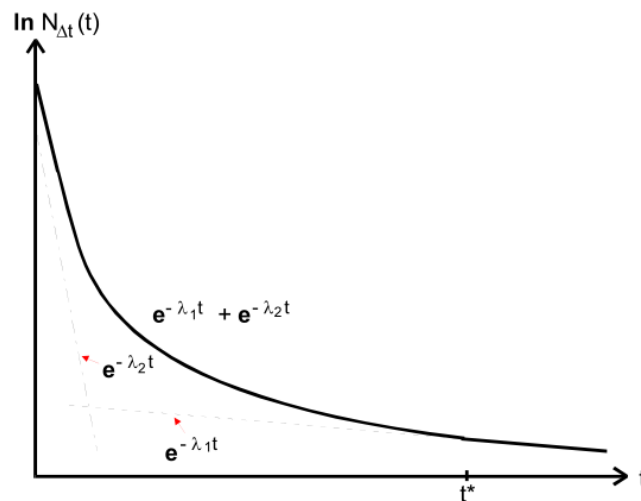


Abbildung 2: Zerfallskurve mit zwei verschiedenen schnell ablaufenden Zerfällen.[1]

Hier sind gleich zwei Zerfälle überlagert, ein kurzlebiger und ein langlebiger. Für die Auswertung wird zunächst die Zerfallskonstante des langlebigen Zerfalls bestimmt. Dann wird diese vom kurzlebigen Zerfall abgezogen.

3 Durchführung

3.1 Bestimmung der Untergrundrate

Das erste Problem der Messung ist die Umgebungsradioaktivität, diese sollte so niedrig wie möglich gehalten werden. Dennoch muss diese Grundstrahlung aus den späteren Berechnungen herausgerechnet werden können. Dafür wird zunächst die Untergrundrate N_U berechnet. Für alle weiteren Versuche wird der Versuchsaufbau aus Abbildung 3 verwendet.

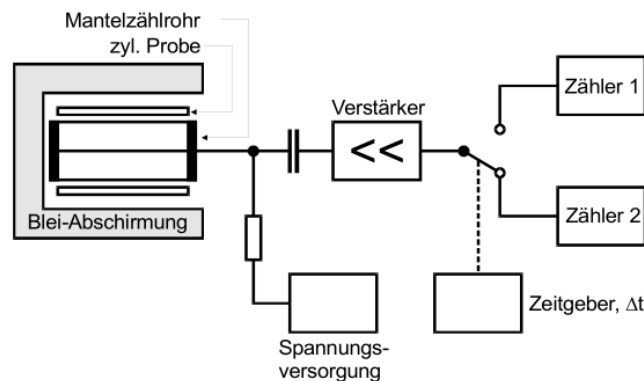


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Versuchs.[1]

In der Nullmessung, wird keine Probe eingesetzt. Für 300 s wird N_U sieben mal gemessen und die Zählrate notiert.

3.2 Bestimmung der Halbwertszeit von Vanadium

Es wird eine zerfallende Vanadium-Probe mit einer Apparatur wie in Abbildung 1 erzeugt und dann sofort in die Messapparatur gesteckt. Mit einer Integrationszeit von 30 s werden dann die Zerfälle gemessen. Nach 1230 s wird die Messung beendet.

3.3 Bestimmung der Halbwertszeit von Rhodium

Für Rhodium wird die gleiche Messung wie für Vanadium durchgeführt. Der Unterschied ist hierbei, dass die Integrationszeit 15 s beträgt und dementsprechend bis 630 s gemessen wird.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der Untergrundrate

Die Messung der einfallenden Strahlung ohne eine vor den Zähler gestellte Probe ergab die Messwerte

$$N_0 = \{129, 143, 144, 136, 139, 126, 158\} \frac{\text{Imp}}{300\text{s}}.$$

Nun wird der Mittelwert und der Fehler des Mittelwerts berechnet und ergibt eine durchschnittliche Untergrundrate von

$$\begin{aligned}\bar{N}_0 &= (139 \pm 4) \frac{\text{Imp}}{300\text{s}} \\ &= (0,46 \pm 0,01) \frac{\text{Imp}}{\text{s}}.\end{aligned}$$

4.2 Bestimmung der Halbwertszeit von Vanadium

Die Messreihe der Intensität der zerfallenden Vanadiumprobe ($^{52}_{23}\text{V}$) ergab die Messwerte in Tabelle 1. Von diesen Werten wird für alle folgenden Berechnungen die Untergrundrate $N_0 = (13,9 \pm 0,4) \frac{\text{Imp}}{30\text{s}}$ abgezogen. Diese korrigierten Werte sind außerdem in Abbildung 4 logarithmisch dargestellt. Als Fehler wird hier aufgrund der Poissonverteilung $\Delta N = \sqrt{N}$ angenommen.

Tabelle 1: Messergebnisse für die Vanadiumprobe

t / s	$N / \frac{\text{Imp}}{30\text{s}}$	t / s	$N / \frac{\text{Imp}}{30\text{s}}$	t / s	$N / \frac{\text{Imp}}{30\text{s}}$
30	189 ± 13	480	61 ± 7	930	17 ± 4
60	197 ± 14	510	56 ± 7	960	24 ± 4
90	150 ± 12	540	40 ± 6	990	21 ± 4
120	159 ± 12	570	45 ± 6	1020	25 ± 5
150	155 ± 12	600	32 ± 5	1050	21 ± 4
180	132 ± 11	630	27 ± 5	1080	24 ± 4
210	117 ± 10	660	43 ± 6	1110	25 ± 5
240	107 ± 10	690	35 ± 5	1140	17 ± 4
270	94 ± 9	720	19 ± 4	1170	20 ± 4
300	100 ± 10	750	28 ± 5	1200	19 ± 4
330	79 ± 8	780	27 ± 5	1230	20 ± 4
360	69 ± 8	810	36 ± 6	1260	18 ± 4
390	81 ± 9	840	25 ± 5	1290	16 ± 4
420	46 ± 6	870	29 ± 5	1320	17 ± 4
450	49 ± 7	900	18 ± 4		

Nun wird nach Gleichung 2 eine Ausgleichsgerade mit

$$\ln(N(t)) = \lambda * t + b \quad (4)$$

über die Funktion `curve_fit` der Python Bibliothek SciPy bestimmt und ebenfalls in Abbildung 4 dargestellt.[2] Die Bestimmung der Parameter ergibt

$$\lambda = (-0,0032 \pm 0,0001) \frac{1}{s}$$

$$b = 5,32 \pm 0,04.$$

Über Gleichung 3 lässt sich nun die Halbwertszeit zu

$$T = (215 \pm 7) s$$

berechnen. Ein Vergleichswert aus der Literatur ist

$$T_{\text{lit}} = 224,58 s.[3]$$

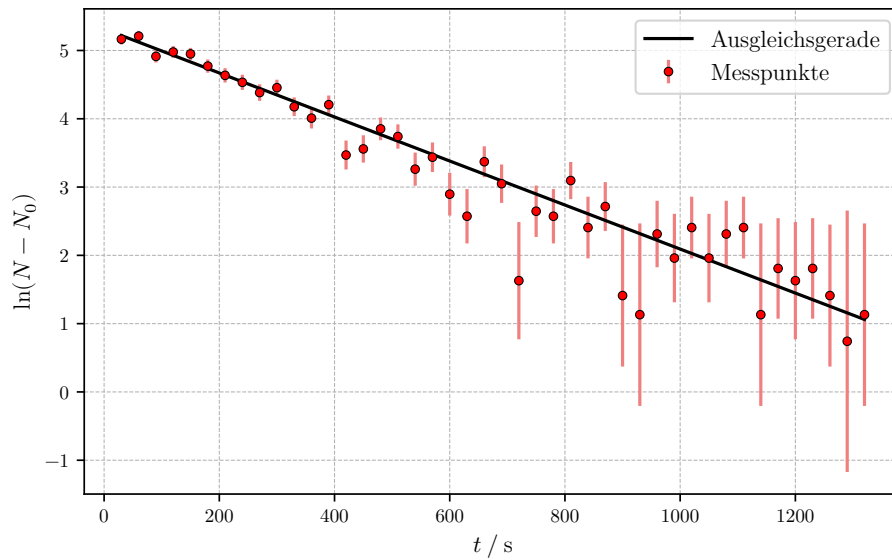


Abbildung 4: Plot der Messwerte für Vanadium

4.3 Bestimmung der Halbwertszeit von Rhodium

Die Messreihe der Intensität der zerfallenden Rhodiumprobe (ca. 10 % $^{104i}_{45}Rh$ und 90 % $^{104}_{45}Rh$) ergab die Messwerte in Tabelle 2. Auch hier wird für die weiteren Berechnungen die Untergrundrate $N_0 = (6,96 \pm 0,20) \frac{\text{Imp}}{15s}$ abgezogen und der Fehler $\Delta N = \sqrt{N}$ angenommen. Diese korrigierten Werte sind außerdem in Abbildung 5 logarithmisch dargestellt.

Hier sind allerdings im Vergleich zu Vanadium zwei Zerfallsprozesse zu beobachten. Die Halbwertszeit von $^{104i}_{45}Rh$ ist deutlich geringer und liefert wie in Abbildung 5 zu sehen ab einem gewissen Zeitpunkt nahezu keinen Beitrag zur Intensität mehr. Um also die

Tabelle 2: Messergebnisse für die Rhodiumprobe

t / s	$N / \frac{\text{Imp}}{15\text{s}}$	t / s	$N / \frac{\text{Imp}}{15\text{s}}$	t / s	$N / \frac{\text{Imp}}{15\text{s}}$
15	667 ± 25	240	52 ± 7	465	20 ± 4
30	585 ± 24	255	56 ± 7	480	24 ± 4
45	474 ± 21	270	53 ± 7	495	30 ± 5
60	399 ± 19	285	41 ± 6	510	30 ± 5
75	304 ± 17	300	36 ± 6	525	26 ± 5
90	253 ± 15	315	37 ± 6	540	28 ± 5
105	213 ± 14	330	32 ± 5	555	23 ± 4
120	173 ± 13	345	36 ± 6	570	20 ± 4
135	152 ± 12	360	38 ± 6	585	28 ± 5
150	126 ± 11	375	34 ± 5	600	17 ± 4
165	111 ± 10	390	40 ± 6	615	26 ± 5
180	92 ± 9	405	21 ± 4	630	19 ± 4
195	79 ± 8	420	35 ± 5	645	13 ± 3
210	74 ± 8	435	33 ± 5	660	17 ± 4
225	60 ± 7	450	36 ± 6		

Halbwertszeit vom langlebigeren $^{104}_{45}\text{Rh}$ zu bestimmen, wird eine Ausgleichsgerade durch alle Messwerte ab $t = 270 \text{ s}$ gelegt, da hier der Übergang vom kurzlebigen zum langlebigen Zerfallsprozess nahezu vorüber ist. Somit ergeben sich nach Gleichung 4 die Parameter zu

$$\lambda_{\text{lang}} = (-0,0027 \pm 0,0004) \frac{1}{\text{s}}$$

$$b_{\text{lang}} = 4,35 \pm 0,17$$

und über Gleichung 3 eine Halbwertszeit von

$$T_{\text{lang}} = (257 \pm 37) \text{ s}.$$

Der entsprechende Vergleichswert aus der Literatur ist

$$T_{\text{lang,lit}} = 260,4 \text{ s} \cdot [3]$$

In der Zeit bis $t = 210 \text{ s}$ ist analog nahezu nur der kurzlebige Zerfall zu beobachten, allerdings müssen hier die Messwerte über die extrapolierte Ausgleichsgerade des langlebigen Prozesses korrigiert werden. Also werden die in blau dargestellten Messwerte über

$$N_{\text{korrigiert}}(t) = N(t) - \exp(\lambda_{\text{lang}} * t + b_{\text{lang}}) \quad (5)$$

berechnet und für die Ausgleichsgerade des kurzlebigen Prozesses verwendet. Damit ergeben sich die Parameter zu

$$\lambda_{\text{kurz}} = (-0,0161 \pm 0,0004) \frac{1}{\text{s}}$$

$$b_{\text{kurz}} = 6,68 \pm 0,03$$

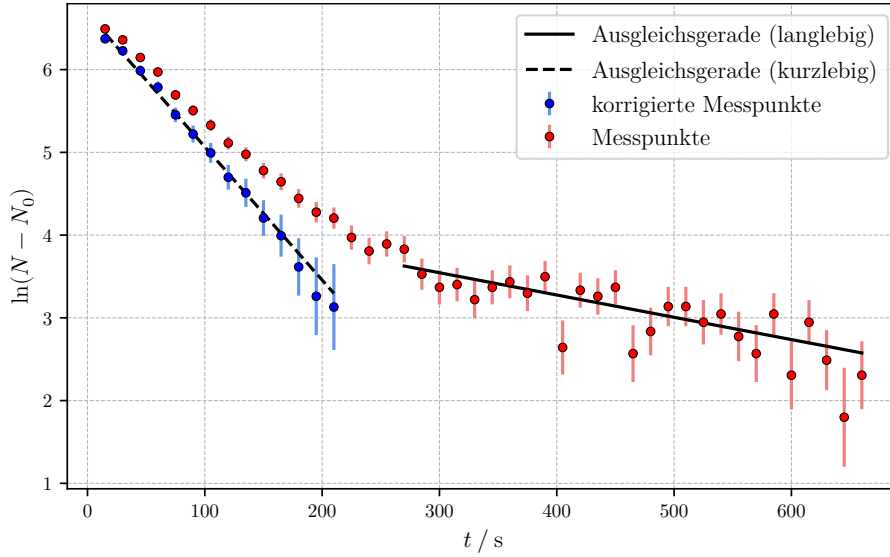


Abbildung 5: Plot der Messwerte für Rhodium

und über Gleichung 3 eine Halbwertszeit von

$$T_{\text{kurz}} = (43 \pm 1) \text{ s}.$$

Der entsprechende Vergleichswert aus der Literatur ist

$$T_{\text{kurz,lit}} = 42,3 \text{ s} \cdot [3]$$

5 Diskussion

Die Messung der Untergrundrate zeigt ausreichend geringe Abweichungen in der gemessenen Intensität, deswegen scheint der Mittelwert $\bar{N}_0 = 139 \frac{\text{Imp}}{300\text{s}}$ geeignet um damit zu rechnen. Allerdings muss bemerkt werden, dass dies eine Näherung ist und zu weiteren Abweichungen in allen nachfolgenden Berechnungen führen wird.

Die Messung der Vanadiumprobe zeigt den erwarteten exponentiellen Verlauf, allerdings sind die Messwert am Ende der Messzeit sehr ungenau, da die Intensität fast so niedrig ist wie der Untergrund. Die Halbwertszeit wurde zu

$$T_V = (215 \pm 7) \text{ s}$$

ermittelt und ergibt somit eine Abweichung vom Literaturwert von

$$\Delta T_V = 4,27 \text{ \%}.$$

Die Messung der Rhodiumprobe zeigt ebenfalls das erwartete Bild, wobei auch hier die Messwerte am Ende der Messreihe hohe Ungenauigkeiten zeigen. Zuerst wurde die Halbwertszeit vom langlebigen Zerfalls zu

$$T_{\text{Rh,lang}} = (257 \pm 37) \text{ s}$$

ermittelt und ergibt eine Abweichung vom Literaturwert von

$$\Delta T_{\text{Rh,lang}} = 1,31 \% .$$

Allerdings muss hier erwähnt werden dass der statistische Fehler sehr hoch ist.

Dann wurde mithilfe der extrapolierten Ausgleichsrechnung des langlebigen Zerfalls der kurzlebige Zerfall untersucht. Hier ergibt sich eine Halbwertszeit von

$$T_{\text{Rh,kurz}} = (43 \pm 1) \text{ s}$$

und eine Abweichung vom Literaturwert von

$$\Delta T_{\text{Rh,kurz}} = 1,65 \% .$$

Insgesamt konnten trotz der gemachten Näherungen und der statistischen Natur des Versuchs gute Schätzwerte für die Halbwertszeiten berechnet werden.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 702 Aktivierung mit Neutronen*. 2020.
- [2] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [3] Thomas Jefferson National Accelerator Facility - Office of Science Education. *The Periodic Table of Elements*. URL: <https://education.jlab.org/itselemental/> (besucht am 06.06.2020).