



Mehr Transparenz bei den Elementen mit dem PSE³!

Ein neues Periodensystem für den Chemieunterricht

MATTHIAS KREMER – ULRICH BEE

Werden die verschiedenen Bedeutungen des Begriffs »Element« (Stoff, Atomart, »Das, was bei chemischen Reaktionen erhalten bleibt«, kleines Teilchen eines elementaren Stoffes) nicht auseinandergehalten und für Schüler durchschaubar gemacht, ist das Verständnis für chemische Vorgänge erschwert. Ausgerechnet die üblichen Periodensysteme tragen zur Verwirrung bei, weil sie oftmals Bilder eines Gegenstandes und Atomart unkommentiert zusammenstellen. Im Artikel werden die didaktischen Problemfelder des Elementbegriffs dargelegt und das neue Periodensystem PSE³ vorgestellt, bei dem Stoffebene und Atomart streng getrennt sind und auf einer dritten Ebene die Verknüpfung der Atome zu Teilchen bzw. Gittern, sowie die daraus resultierende chemische Formel erscheinen. Außerdem werden die im PSE³ aufgeführten zum Teil neuartigen Daten erläutert.

1 Einleitung

Muss ich für die molare Masse von Sauerstoff 16 oder 32 g/mol nehmen? Ist Ozon ein Element oder eine Verbindung? War im bleihaltigen Benzin wirklich Blei drin?

Solche Schülerfragen zum vielschichtigen Begriff »Element« kennt jede Lehrkraft. Die üblichen Periodensysteme lassen jedoch viele dieser Fragen offen. Der folgende Artikel stellt einen Lösungsvorschlag in Form eines »didaktisierten« neuen Periodensystems auf drei Ebenen vor, das PSE³, das 2013 auf der MNU-Tagung in Bremerhaven und 2014 beim MNU-Bundeskongress in Kassel zur Diskussion gestellt wurde. Beim GDCh-Wissenschaftsforum 2015 in Dresden wurde es schließlich in einem Kurzvortrag und auf einem Poster von den Autoren präsentiert.

2 Die Bedeutungsvielfalt des Elementbegriffs

Ohne Elemente und ihr Periodensystem ist Chemieunterricht nicht denkbar. *Element* ist ein zentraler Grundbegriff der Chemie, es ist jedoch bei weitem nicht sofort klar, was darunter verstanden werden soll. Es tritt hier ein chemietypisches Phänomen auf: das »Wandern« des Begriffsinhalts von der Stoff- auf die Teilchenebene. Dies bringt einige didaktische Fragestellungen mit sich.

Elemente treten zunächst als die Stoffe in Erscheinung, die sich, im Gegensatz zu den Verbindungen, durch vollständige Analyse – also mithilfe chemischer Reaktionen – nicht in verschiedene Stoffe zerlegen lassen. Die Anordnung der Elemente in Gruppen des Periodensystems wird zunächst durch die Ähnlichkeit ihrer Eigenschaften begründet, wobei man sich tunlichst jeweils auf die beiden »äußeren« Hauptgruppen (Alkali- und Erdalkalime-

talle bzw. Halogene und Edelgase) beschränkt. Die Ähnlichkeit von Blei und Kohlenstoff, beides Elemente der IV. Hauptgruppe, ist Schülerinnen und Schülern ohne Kenntnis des Atombaus genauso wenig zu vermitteln wie die Existenz von Modifikationen. Später wird im Unterricht deutlich, dass die Ordnung des Periodensystems durch den Bau der Atome der jeweiligen Elemente bedingt ist, und plötzlich bekommt der Begriff »Element« eine andere Bedeutung: Atomart.

Ohne die Unterscheidung der reinen Stoffe in Elemente und Verbindungen ist es schwierig, Ordnung in die stoffliche Welt zu bekommen. Rückt man aber Atome zu sehr ins Zentrum des Anfangsunterrichts, führt man die Schülerinnen und Schüler zunächst leicht auf einen Irrweg, etwa durch die Aussage, die oft mit DALTONS Atommodell verknüpft wird, jedes Element bestehe aus lauter gleichen Teilchen, den Atomen. Schon beim Element Sauerstoff stoßen die Lernenden irgendwann auf einen Widerspruch zu dieser Vorstellung: Sie müssen lernen, dass die kleinen Teilchen dieses Elements keine Atome, sondern Moleküle sind. Da im herkömmlichen Periodensystem zu jedem Element aber nur die Atomsymbole notiert sind, hört man im Unterricht oft folgende Frage: »Woher kann man denn die richtige Formel für irgendeinen elementaren Stoff wissen?« Diese für die Lernenden schwierige Situation haben PARCHMANN und LÜHKEN im Titel ihres Aufsatzes treffend ausgedrückt: »Sauerstoff ist O ... oder O₂ ... oder ein gasförmiger Stoff?!« (PARCHMANN & LÜHKEN, 2014). Außer den beiden erwähnten Bedeutungen des Begriffs Element gibt es noch eine dritte, die auf LAVOISIER zurückgeht. Ein Element ist danach das, was bei einer chemischen Reaktion – anders als die Ausgangsstoffe, die zu existieren aufhören, – erhalten bleibt. Diese Bedeutung erläutert TEN VOORDE (1994) am Beispiel der Synthese von Kupferoxid. Die Ausgangsstoffe Kupfer und Sauerstoff gibt es nach der Reaktion nicht mehr, bei der anschließenden Reduktion mit Wasserstoff entzieht dieser aber der Verbindung angeblich »den Sauerstoff«. Diesen Widerspruch können die Lernenden nur durch die Vorstellung lösen, Kupfer und Sauerstoff steckten doch noch im Kupferoxid. Sie begehen also den Irrtum, sich Verbindungen als Gemische vorzustellen, oder sie beginnen am Erfolg logisch folgerichtigen Denkens in Chemie zu zweifeln. Beides wäre fatal.

TEN VOORDE schlug als *Bezeichnung des Vorhandenseins der Elemente* in Verbindungen den Begriff »Prinzip« vor (TEN VOORDE, 1994). Im Schulalltag ist dieser Begriff heute aber kaum anzutreffen.

Ein ähnliches Schicksal widerfuhr dem Begriff »Elementsubstanz«, der in den 1970er Jahren in den Schulen der DDR eingeführt wurde. WENZL bedauert zwar 1992, »wie schnell der neue Elementbegriff [...] wieder verdrängt« wurde (WENZL, 1992), untermauert den Vorschlag aber 2009 mit Argumenten der IUPAC, die den Begriff »Element« für »Atomart einer bestimmten Protonenzahl« reserviert (WENZL, 2009). Die in den KMK-Bildungsstandards geforderte klare Trennung von Stoff- und Teilchenebene insbesondere durch den Standard über die »Deutung von Stoffeigenschaften auf Teilchenebene« (KMK, 2004) führt in immer zahlreicheren Schulbüchern zu einer größeren Sorgfalt in Bezug auf den Elementbegriff. Aber ganz von der Hand weisen lässt sich nicht, was SCHÖNEMANN auf den Vorschlag, »Element« nur noch für die Atomart zu verwenden, einwendet (SCHÖNEMANN, 1998): »Es kann nicht Aufgabe der Schule

sein, »gegen die Chemie« zu unterrichten.« Das Element sei eben zunächst auf der stofflichen Ebene definiert worden, weshalb sich diese Verwendung des Begriffs sicher erhalte. Hinzu kommt, dass laut PARCHMANN & LÜHKEN (2014) kein empirischer Beleg bekannt ist, der eine klare Entscheidung für eine begriffliche Trennung des Elementbegriffs auf der stofflichen und der atomaren Ebene rechtfertigt. Entscheidend sei für Lernende die Klarheit der im Unterricht verwendeten Begriffe.

Mit REHM und STÄUDEL kann man feststellen, dass im Unterricht meist alle drei Verwendungsweisen des Elementbegriffs nebeneinander existieren, ihre Unterschiede jedoch kaum explizit thematisiert würden. »Dies führt im naturwissenschaftlichen Unterricht zu Lernschwierigkeiten, die durch die Lehrperson und/oder durch Schulbücher produziert werden« (REHM & STÄUDEL, 2012).

3 Klarheit des Elementbegriffs in Periodensystemen

Üblicherweise haben die Schüler bei Elementen die Vorstellung eines Stoffes. Das rötliche Metall Kupfer, das bei Zimmertemperatur gasförmige Nichtmetall Sauerstoff oder der schwarze Stoff Kohlenstoff sind Beispiele für Elemente, die Schülerinnen und Schüler kennen. Wird das Periodensystem thematisiert, sind dort die Elemente durch ihre Atomsymbole dargestellt. Dies führt zu der Vorstellung, dass die Atome die kleinen Teilchen der bekannten Elemente seien. Das vermeintlich logische Begriffsgebäude kommt dann ins Wanken, wenn klar wird, dass bei Nichtmetallen in vielen Fällen keine Atome, sondern Moleküle vorliegen. Die immer wieder auftauchende Schülerfrage, ob die molare Masse von Sauerstoff nun 16 (wie im PSE abzulesen) oder 32 g/mol betrage, zeugt von der entstandenen Unsicherheit. Nicht nur die Bindungen zwischen Nichtmetallatomen »verschweigt« das PSE. Auch zwischen Metallatomen liegen chemische Bindungen vor, was hier aber nicht auffällt, da das Atomsymbol als chemische Formel bei Metallen gemäß der gängigen Praxis trotzdem korrekt ist.

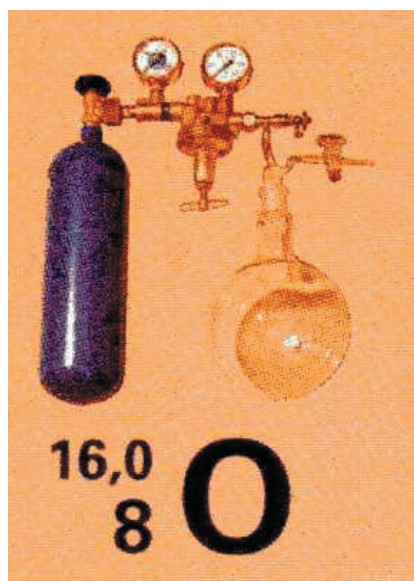


Abb. 1.
Elementfeld
»Sauerstoff« aus
dem PSE von
MENZEL
(1984, Foto:
BERNHARD HEINZE)

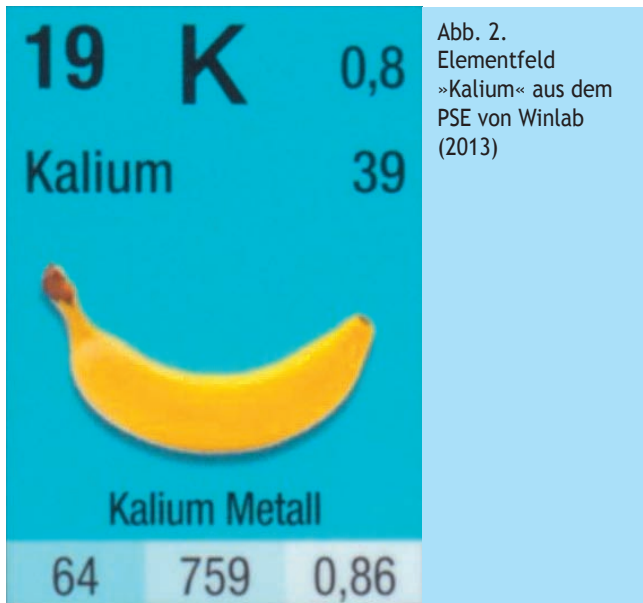


Abb. 2. Elementfeld »Kalium« aus dem PSE von Winlab (2013)

recht das Missverständnis, dies sei die dazugehörige Formel. Die Verwirrung wird noch größer, wenn manche Abbildungen den elementaren Stoff selber, andere jedoch Verbindungen des Elements zeigen. Dies wird in Abbildung 2 besonders deutlich.

Mehr Klarheit haben BLUME, KUNZE, OBST, ROSSA & SCHÖNEMANN (1996) bei den Nichtmetallen geschaffen. Sie führen, wie in Abbildung 3 zu sehen ist, neben dem Atomsymbol auch das Molekülsymbol und ein Molekülmodell auf, die Stoffebene kommt nur verbal in Form von Hinweisen zur Verwendung des Elements vor. Konsequenterweise wird hier vom »Element« ausschließlich im Sinne einer Atomsorte gesprochen, während sonst von Elementsubstanzen die Rede ist. Diese Ausdrucksweise kann allerdings gelegentlich das Missverständnis aufkommen lassen, das Element käme nur in Verbindungen und nicht auch in den Elementsubstanzen vor (siehe z. B. unter Stickstoff in Abb. 3).

Um sowohl Stoff- als auch Teilchenebene bei den Elementen aufzuführen, gibt es seit einiger Zeit Periodensysteme, die zusätzlich zum Atomsymbol auch eine Abbildung eines Gegenstandes zeigen, in dem das betreffende Element vorkommt (Abb. 1). Die unmittelbare Nähe zwischen dem Bild des stofflichen Elementes und dem Atomsymbol provoziert aber erst

Modifikationen

Die Tatsache, dass die Eigenschaften von Stoffen nicht nur von der Art der in ihren Teilchen (bzw. Gittern) vorkommenden Atomarten bestimmt werden, sondern auch von deren Art der Verknüpfung, ist die Ursache für die Existenz von Modifikationen (auch Allotrope genannt). Werden Stoffe (zusätzlich zu den Atomsorten) in das Periodensystem aufgenommen, müssten »die Plätze von solchen Elementen mehrfach besetzt sein, von denen es mehrere Allotrope gibt.« (SCHMIDT, 1998).

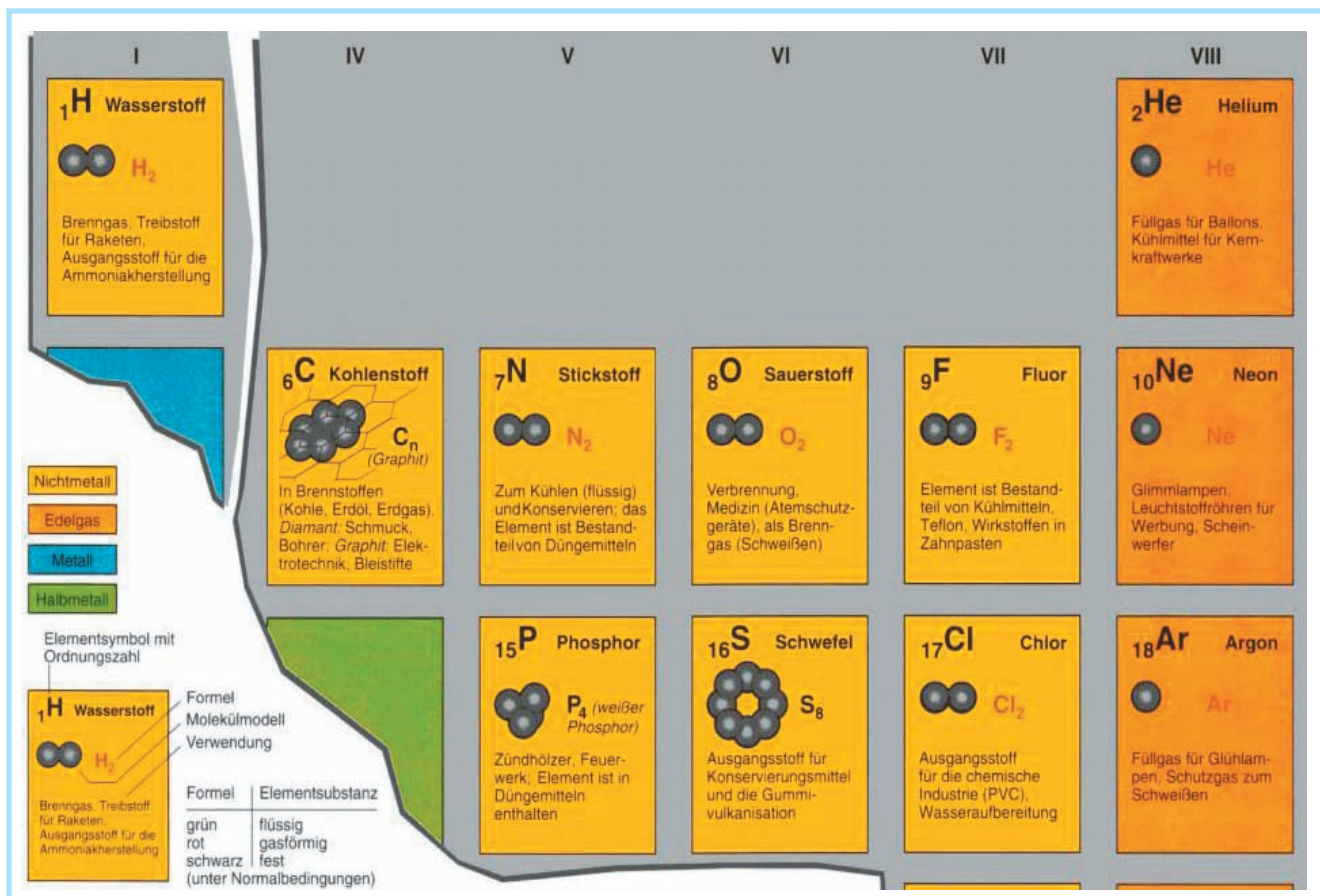


Abb. 3. Ausschnitt aus der Übersicht »derjenigen Elemente des PSE, die nichtmetallische Elementsubstanzen bilden« aus BLUME et al. (1996, 123)

HABELITZ-TKOTZ – sie plädiert dafür, »Element« nur als Begriff der Stoffebene zu verwenden – sieht in der Beschäftigung mit Modifikationen eine hervorragende Möglichkeit, das Wechselwirkungskonzept anzubahnen (HABELITZ-TKOTZ, 2012). Periodensysteme, die Stoffe enthalten, sollten somit auf Modifikationen keinesfalls verzichten. Ein Periodensystem, das Angaben zu den Atomarten, nicht zu den Stoffen enthält, sollte nach Auffassung der Autorin »eigentlich umbenannt werden zum Periodensystem der Atomarten.« Sie plädiert für die strenge Trennung der beiden Periodensystem-Typen: eines für die Atomarten, ein anderes mit Bildern für die Stoffe.

4 Das neue Periodensystem PSE³ (KREMER & BEE, 2015)

Ein Periodensystem, das eine echte Lernhilfe darstellt und nicht Lernhindernisse erzeugt, sollte sich nach unserer Auffassung nicht völlig vom bisher Üblichen abwenden. Ein Wegbegleiter im Unterricht soll ja zu dem Ziel führen, die »außerschulische Chemie« besser zu verstehen. Deshalb wird der Elementbegriff von uns nicht durch andere Bezeichnungen ersetzt, sondern im Periodensystem PSE³ auf drei Ebenen repräsentiert.

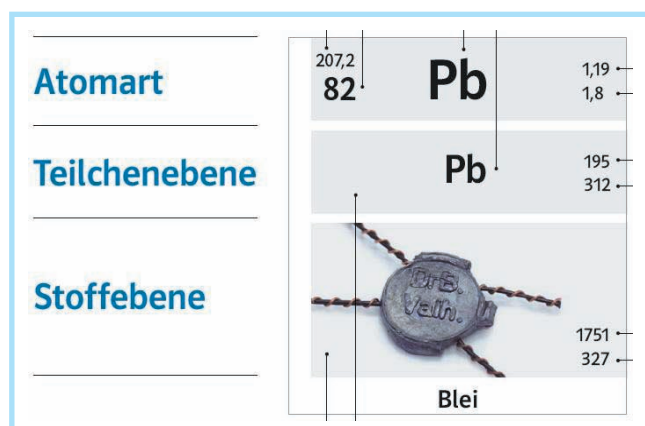


Abb. 4. Die drei Ebenen des PSE³ (Foto: normaldesign, Schwäbisch Gmünd, Ernst Klett Verlag)

Neue Begriffe für die Schule einzuführen, ist ein sehr mühevoller Unterfangen, das bisher selten erfolgreich verlief. Anstatt den Elementbegriff für die eine oder andere Verwendung reservieren zu wollen, scheint es uns sinnvoller, den Bedeutungswandel zu thematisieren, wie es auch SCHMIDT (1998, 134) anregt. Im Periodensystem sollen also Atomart und Stoff – allerdings deutlich voneinander getrennt – vorkommen, beides wird »Element« genannt und bei Bedarf oder Unklarheit präzisiert. Beide Arten von Element, die in einem Feld des Periodensystems stehen, tragen in den meisten Fällen auch denselben Namen. Die Atomsorte Pb heißt eben genauso »Blei« wie das weiche Metall. Ausnahmen gibt es nur bei Modifikationen, etwa bei der Atomsorte »Sauerstoff« (Symbol O), dessen zugehörige Stoffe den Namen

Ozon bzw. Sauerstoff tragen. Gerade bei den Modifikationen wird deutlich, dass die Atomsorte allein die Eigenschaften eines Stoffes nicht festlegt. Deshalb wird im neuen Periodensystem eine dritte Ebene eingeführt, die anhand der Farbe des Feldes (Abb. 5) Informationen über die Verknüpfung der Atome miteinander enthält. Im Falle des Bleis (dunkelblau) ist dies die Angabe, dass die Atome miteinander zu einem Metallgitter verbunden sind, bei den Sauerstoff-Modifikationen (orange, Abb. 6), dass es sich bei den kleinen Teilchen beider Stoffe um Moleküle handelt. Damit ist auch klar, dass Ozon keine Verbindung sein kann, da es ja im Periodensystem der Elemente vorkommt.

Woher die Ursache für das häufige Missverständnis rührt, Ozon sei eine Verbindung, hat SCHMIDT (1998, 133) am Beispiel Fulleren erklärt: Es liege im Wesentlichen an der im Deutschen vorliegenden sprachlichen Nähe zwischen *Verbindung* und chemischer *Bindung*, die suggeriert, wann immer zwischen Atomen eine chemische Bindung existiere, gehöre der zugehörige Stoff zur Klasse der Verbindungen – ein Irrtum, wie das Element Sauerstoff mit Molekülen aus 2 Atomen oder eben die Kohlenstoff-Modifikation Fulleren mit Molekülen aus 60 Atomen deutlich machen.

Dem Feld der Teilchenebene des PSE³ können die Schüler die chemischen Formeln entnehmen, die sie z. B. für Reaktionsgleichungen oder Berechnungen benötigen.

Die Darstellung in Abbildung 4 zeigt die drei Ebenen des PSE³ am Beispiel des Elements Blei. Das weiße Feld mit dem Elementnamen zieht sich auf der linken Seite bis nach oben, um anzudeuten, dass der Name für das Element auf allen Ebenen gilt. Die optische Nähe macht jederzeit deutlich, dass mit dem Begriff »Element« drei unterschiedliche Bedeutungen verknüpft sind. Spricht man im Unterricht vom »Element Blei«, kann so leicht erläutert werden, von welchem »Element« man gerade spricht, von der Atomart, deren Atome in verschiedenen Bindungszuständen auftreten können, dem Stoff oder den kleinen Teilchen des Stoffes. Die Frage nach dem bleihaltigen Benzin kann mit dem PSE³ mit Hinweis auf die Ebene »Atomart« auf verständliche Weise geklärt werden: Es geht nicht um den Stoff. Das Benzin enthält eine Verbindung, in deren Teilchen unter anderem ein oder mehrere Bleiatome gebunden sind.

4.1 Beschreibung der drei Ebenen

Insgesamt acht verschiedene Farben sind zu sehen (Abb. 5), wobei natürlich keine Zuordnungen etwa nach den Vorgaben des Orbitalmodells vorgenommen werden. Vielmehr werden wesentliche Lerninhalte des Anfangsunterrichts, nämlich Stoff- und Teilchenarten, farblich gekennzeichnet. Dabei wurde aus didaktischen Gründen sinnvoll vereinfacht.

Atomart				
Teilchen	Metallgitter	Andere Gitter	Moleküle	Atome
Stoff	Metalle	Halbmetalle	Nichtmetalle	

Abb. 5. Unterteilungen der drei Ebenen im PSE³ (Abb.: MATTHIAS KREMER)

Auf der *Ebene der Atomarten* stehen im Zentrum die Atomsymbole. Atome sind aber als freie Teilchen nur in Ausnahmefällen existent. Im Normalfall gehen sie miteinander chemische Bindungen ein, wobei sie sich leicht verändern. Das **Atomsymbol** wird dabei jedoch nicht verändert. So kann mit dem Symbol Na ein freies Natriumatom gemeint sein, oder auch ein Natriumatom, das mit anderen Natriumatomen durch chemische Bindungen ein Metallgitter bildet, oder (z. B. in der Formel NaCl) ein einfach positiv geladenes Natrium-Kation. Ebenso kann mit dem Symbol »Cl« ein freies Chloratom gemeint sein, aber auch, wie z. B. in HCl, ein Chloratom, das mit einem Wasserstoffatom zu einem Chlorwasserstoff-Molekül verbunden ist und wegen seiner höheren Elektronegativität leicht negativ teilgeladen ist, oder sogar ein einfach negativ geladenes Chlorid-Ion, wie etwa in der Formel NaCl. Damit ist hier die oben von TEN VOORDE (1994) »Prinzip« genannte Bedeutung des Elementbegriffs konkret gefasst.

Hinweis: Ein Periodensystem, mit dessen Hilfe Lernende Formeln von Verbindungen gut ermitteln können, haben SAUERMAN, BARKE, RÖLLEKE & HILBICH (2010) nach BRANDENBERGER entwickelt. Es steht zum Download auf der Seite www.chemisch-denken.de zur Verfügung.

Auf der *Teilchenebene* treten als Teilchenarten außer Atomen und Molekülen auch Metallgitter auf. Alle anderen Strukturen, die bei den Halbmetallen und dem Nichtmetall Diamant auftreten, werden unter »Andere Gitter« zusammengefasst. Auf dieser Ebene erscheint konsequenterweise die chemische Formel, die ja die kleinen Teilchen eines Stoffes beschreibt.

Zunächst wurde vorgesehen, Atome, die zu einem Gitter verbunden sind, mit einem besonderen Symbol zu versehen, etwa Fe_z , Fe_n oder $\{Fe\}$, um sie von unverbundenen Atomen, die bei den Edelgasen vorliegen, zu unterscheiden. Mit demselben Argument wie beim Elementbegriff wurde davon abgesehen: Es ist illusorisch zu erwarten, dass solche neuen Vorschläge allenthalben übernommen würden. Die Tatsache, dass nun an vielen Stellen des Periodensystems dasselbe Symbol zweimal (als Atomsymbol und als chemische Formel) auftritt, kann zum Anlass gemacht werden, das Wesen der chemischen Formel als einer mit einer gewissen Willkür festgelegten Symbolsprache zu thematisieren. Bei den Formeln von Modifikationen, die sich in der Gitterstruktur unterscheiden, wurde als Index eine Abkürzung gewählt, die sich auf den Namen der Modifikation bezieht, etwa C_{Gr} (Formel für Graphit) und C_{Dia} (Formel für Diamant). Dies stellt unseres Erachtens keine unzulässige Durchmischung von Stoff- und Teilchenebene dar, sondern macht auf die wichtige Struktur-Eigenschafts-Beziehung aufmerksam: Die Formel C_{Gr} ist eine Kurzschreibweise, die darüber informiert, dass die Kohlenstoffatome so miteinander verbunden sind wie es im Stoff Graphit der Fall ist. Die Formel C sagt dagegen nur aus, dass es sich um Kohlenstoffatome handelt, aber nicht, in welcher Weise sie miteinander verbunden sind.

Auf der *Stoffebene* tauchen nur drei Gruppen auf: Metalle, Nichtmetalle und Halbmetalle, bei deren Zuordnung im Wesentlichen auf HOLLEMAN-WIBERG (2007) zurückgegriffen wurde.

Bei den Bildern wurde darauf geachtet, dass keine Verbindungen des Elements gezeigt werden. Gelegentlich zeigt ein kleiner Pfeil auf den Teil des Gegenstandes, der aus dem genannten Element besteht. Die Bilder zeigen die Elemente bei Zimmertemperatur, bis auf die farblosen Gase, bei denen meist ein gasgefüllter, typischer Gegenstand gewählt wurde. Da gasförmiges Ozon nicht aufbewahrt werden kann, wurde ausnahmsweise ein Bild von flüssigem Ozon gewählt, also Ozon bei sehr tiefen Temperaturen, was durch den Beschlag am Reagenzglas (Abb. 6) deutlich werden soll.



16,0 8	O	2,18 3,5	
O ₂	249 121	O ₃	202 128
Sauerstoff		Ozon	
	-183 -219		-111 -193
Sauerstoff			

Abb. 6.
Elementfeld
»Sauerstoff«
im PSE³
(Fotos:
BERNHARD
HEINZE, Ernst
Klett Verlag)

4.2 Größenangaben im PSE³

Am rechten Rand eines Elementfeldes sind sechs Zahlenwerte zu sehen (Abb. 6). Sie gehören zu Größen, die genau zu der jeweiligen Ebene des PSE³ passen. Einige davon sind in einer ungewöhnlichen Einheit, andere sind möglicherweise neu, ermöglichen aber interessante Aufgaben- und Fragestellungen für den Unterricht oder als Maßnahme der individuellen Förderung.

Ebene Atomart

Die erste Ebene enthält außerdem die Ordnungszahl, Atommasse, bei radioaktiven Elementen die Nukleonenzahl des Isotops mit der größten Halbwertszeit (in Klammern).

Erste Ionisierungsenergie E_I

Die Ionisierungsenergie wird oft in kJ/mol oder in Elektronenvolt angegeben. Da sie hier als Größe der Atomsorte aufgeführt wird, bietet sich die Angabe für ein einziges Atom anstelle eines Mols Atome an, und zwar in einer Einheit, die auch sonst im Chemieunterricht Verwendung findet. Um zu »handlichen« Zahlenwerten zu kommen, wurde die Einheit Attojoule (aJ) gewählt. Umrechnung: $1 \text{ aJ} = 10^{-18} \text{ J} = 10^{-21} \text{ kJ}$.

Elektronegativität

Es werden die von LINUS PAULING ermittelten Werte angegeben. Obwohl seit längerem auch EN-Werte für Edelgase bekannt sind, werden diese im PSE³ als wenig schulrelevant weggelassen, da die PAULING-Definition Zahlenwerte über 4,0 nicht vorsieht, laut JANSEN (1995) Heliumatome aber die EN 4,63 haben.

Teilchenebene

In der zweiten Ebene des PSE³ wird die Tatsache der Bindung zwischen den Atomen durch eine energetische und eine geometrische Größe genauer beschrieben:

Atomisierungsenergie $\Delta_{\text{atom}}H$

Um vergleichen zu können, wie stark die Bindungen zwischen den Atomen sind, wird die Energie angegeben, die benötigt wird, um eine entsprechende Stoffportion in 1 mol freie Atome zu überführen. Sie entspricht der molaren Standard-Atomisierungsenthalpie (Einheit kJ/mol), die für 25 °C tabelliert ist. Bei zweiatomigen Molekülen ist dies die Hälfte der Bindungsenergie, da sich diese auf 1 mol Moleküle bezieht (gebildet aus 2 mol Atomen), die Atomisierungsenergie jedoch auf 1 mol Atome (nach der Spaltung von 0,5 mol Molekülen). Je höher der Zahlenwert, desto stärker sind die Atome mit ihren Nachbaratomen verknüpft. Dies kann eine hohe Anzahl der Bindungen oder eine Bindung hoher Bindungsenergie zur Ursache haben. Die Größenwerte der Atomisierungsenergien sind mit einer Ausnahme (Se, aus HOLLEMAN-WIBERG, 2007) aus den Daten der molaren Standardbildungsenthalpien der gasförmigen Stoffe, die aus Atomen bestehen, im CRC-Handbook of Chemistry and Physics (HAYNES, 2010) ermittelt.

Durchschnittlicher Atomabstand \bar{d} bzw. Bindungslänge R

Einheit Pikometer (1 pm = 10⁻¹² m).

Die Größe \bar{d} sagt etwas über die Größe der Atome und die Struktur des Gitters aus, das sie bilden. Bei Gitterstrukturen berechnet man das durchschnittliche Volumen V , das einem Atom zur Verfügung steht, indem man die Atommasse durch die Dichte dividiert. \bar{d} ist dann die Kantenlänge des Würfels mit dem Volumen V , also $\bar{d} = \sqrt[3]{V}$.

Bei den sechs Elementen, die als freie Atome vorliegen, gibt es zwar bei 25 °C keine Gitterstruktur, aber der durchschnittliche Atomabstand wird bei ihnen genauso definiert.

Aus \bar{d} und der Atommasse ist die Dichte des Stoffes zu berechnen.

Bei Molekülen ist anstelle von \bar{d} die Bindungslänge R angegeben, also der durchschnittliche Abstand zweier miteinander verbundener Atome in dem Molekül.

Stoffebene

Auf der dritten Ebene des PSE³ sind mit der Schmelz- und Siedetemperatur ganz typische Stoffeigenschaften angegeben. Die Einheit ist jeweils °C, die angegebenen Werte gelten für einen Druck von 1013 hPa. Bei Stoffen, die nicht schmelzen, sondern sublimieren oder sich in eine andere Modifikation umwandeln, wird dies durch den Zusatz (S) oder (U) vermerkt.

Die sicher wünschenswerte Eigenschaft »Dichte« wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht aufgeführt, sie kann aber aus anderen angegebenen Größen berechnet werden, sicher eine für Lernende anspruchsvolle Aufgabe.

Die gewählten Größen ermöglichen reizvolle Aufgaben, die vermutete Trends (z. B. Veränderung des Atomabstands innerhalb einer Periode) oder Zusammenhänge (z. B. zwischen Siedetemperatur und Atomisierungsenergie) thematisieren. Beispiele

dazu und Vorschläge zum Einsatz des PSE³ im Unterricht werden Thema einer weiteren Veröffentlichung sein.

Bezugsquelle

Das PSE³ ist entweder kostenlos einschließlich einer Broschüre mit Erläuterungen, Aufgabenbeispielen und Daten als Download zu erhalten (auf www.klett.de den Code 27b2dq eingeben) oder als Handblatt für Schüler zu erwerben (ISBN: 978-3-12-134142-9).

Literatur

BLUME, R., KUNZE, W., OBST, H., ROSSA, E. & SCHÖNEMANN, H. (1996). *Chemie für die Sekundarstufe I, Band 1, Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg*. Berlin: Cornelsen, 123.

HABELITZ-TKOTZ, W. (2012). Wasser – ein lebensspendendes Element. *Naturwissenschaften im Unterricht – Chemie*, 23(128), 28–30.

HAYNES, W. M. (Hg. 2010). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 91. Auflage. London: Taylor & Francis.

HOLLEMAN-WIBERG (2007). *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*, 102. Auflage. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 622.

KMK (2004). *Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss*. München, Neuwied: Luchterhand, 8, 11.

JANSEN, W. (1995). Elektronegativitäten der Edelgase. *Chemkon*, 2(4), 182.

KREMER, M. & BEE, U. (2015). *PSE³ – Das Periodensystem der Elemente in drei Ebenen*. Stuttgart: Klett.

MENZEL, P. (1984). *Aus dem Foto-Periodensystem der Elemente*. Fotos: BERNHARD HEINZE. Erstausgabe als Wandkarte und Handblatt 1984, Stuttgart: Ernst Klett Verlag GmbH.

PARCHMANN, I. & LÜHKEN, A. (2014). Sauerstoff ist O ... oder O₂ ... oder ein gasförmiger Stoff?! *Naturwissenschaften im Unterricht – Chemie*, 25(143), 2–6.

REHM, M. & STÄUDEL, L. (2012). Grundbegriffe und Basiskonzepte der Chemie. *Naturwissenschaften im Unterricht – Chemie*, 23(128), 2–7.

SAUERMAN, D., BARKE, H.-D., RÖLLEKE, R. & HILBICH, C. (2010). Periodensystem. www.chemisch-denken.de (16.11.2016).

SCHMIDT, H.-J. (1998). Ist das Periodensystem eine Tabelle der chemischen Elemente? *Chemkon*, 5(3), 131–134.

VOORDE, H. H. TEN (1994). Verständnis des chemischen Stoffbegriffs mit Hilfe des Prinzips »Element«. *Chemie in der Schule*, 41(4), 137–141.

WENZL, E. (1992). Zur Abiturbildung gehört auch mathematisch-naturwissenschaftliches Denken. *Chemie in der Schule* 39(7-8), 291-293.

WENZL, E. (2009). Chemische Elemente – Stoffe oder Teilchenarten?. *MNU*, 62(7), 434-437.

Winlab (2013). Periodensystem Schülerhandblatt A3. Vincent Leermiddelen (Hg.).

MATTHIAS KREMER, kremer.matthias@semgym-rw.de, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien), Königstr. 31, 78628 Rottweil, ist Bereichsleiter Naturwissenschaften und Fachleiter für Chemie.

ULRICH BEE, bee.ulrich@semgym-rw.de, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien), Königstr. 31, 78628 Rottweil, ist Lehrbeauftragter für Chemie und hat einen Lehrauftrag für Chemiedidaktik an der Universität Konstanz. ■□