

Zweckmäßige Zünder statt zeitraubende Zündmischungen

Viktor Obendrauf

Der klassische Thermit-Versuch zählt wohl zu den spektakulärsten Experimenten, die in der chemiedidaktischen Literatur zum Thema Redoxreaktionen beschrieben sind. Da auch der lebensweltliche Kontext („flüssiges Eisen“, „mobiles Mini-Stahlwerk zum Schienenschweißen“) gegeben ist, findet man diesen beeindruckenden Versuch in Deutschland „nahezu in jedem Chemielehrplan der Sekundarstufe 1“ [1]. In den meisten Schulchemie- und Experimentierbüchern sei der Thermit-Versuch so überzeugend dargestellt, dass es „wohl für jeden Chemielehrer Anreiz und Ansporn ist, diesen Versuch den Schülerinnen und Schülern vorzuführen. Versuchsvorschriften gibt es genügend und die Versuche scheinen alle zu klappen, wenn man den Autoren Glauben schenken darf“ [1].

Bei vielen österreichischen Lehrerinnen und Lehrern der Sekundarstufe 1 ist dieses Experiment erst deshalb besser bekannt geworden, weil es im Rahmen von zahlreichen Arbeitsgemeinschaftstagen und seit 8 Jahren zusätzlich im Rahmen der „Sommerschulen der Chemie“ in Salzburg auch als sichere „Indoor-Version“ praktisch vorgestellt und erprobt wurde. Obwohl in der Literatur – siehe z. B. [2–13] – verschiedenste Versuchsvarianten (inklusive Microscale-Version) zu finden sind, wird vom Verfasser dieses Beitrags seit einigen Jahren eine zeitsparende Variante der Versuchsdurchführung forciert, die sich nunmehr seit vier Monaten auch bei Schauvorführungen im Rahmen einer Chemieausstellung^{Ann.1} tausende Male (!) ohne jeden Versager und Zwischenfall und vor allem ohne nennenswerte Vor- bzw. Nachbereitungszeit zu bewähren hatte.

1. Über 100 Jahre Gießschmelzschweißen

Die technologischen Details und Einsatzbereiche des Thermit-Verfahrens² sind in der chemiedidaktischen Literatur bereits beschrieben – siehe z. B. [4, 14]. Grundsätzliches zum Verfahren selbst soll deshalb an dieser Stelle nicht mehr ausführlich reproduziert werden.

Einige historische Fakten dazu in aller Kürze: Hans Goldschmidt (1861–1923) hatte das von ihm im Jahre 1895 zum Patent angemeldete Verfahren bei einer Tagung der Deutschen Bunsengesellschaft

im Jahr 1898 in Leipzig erstmals einem größeren Kreis vorgeführt und damit beträchtliches Aufsehen erregt. Mit der Erzeugung von reinem flüssigen Eisen und Schlacke ohne weitere Zufuhr von Wärme nach Zündung der Zündkirsche hatte er den Grundstein zur „Aluminothermie“ als Verfahren zur Herstellung von kohlenstofffreien Metallen bei hohen Temperaturen gelegt. Erstmals konnten mit Hilfe von Aluminium aus den Metalloxiden auch schwer schmelzbare Metalle wie Chrom, Mangan und Molybdän reaktiv rein dargestellt und in größerem Maße für die Edelstahl- und Leichtmetallindustrie bereitgestellt werden. Hans Goldschmidt hatte dieses Verfahren auch für die Schweißtechnik schon so weit entwickelt, dass es zum raschen Schweißen von Eisenbahn- und Straßenbahnschienen sowie zum Schweißen von Stahlkonstruktionen zum Einsatz gelangen konnte („Gießschmelzschweißen“, „AT-Schweißen“).

Laut Auskunft der Bundesbahnen und auch des Thermit-Vertreibers in Österreich ist die Aluminothermie heute vor allem beim Verschweißen von Bahn- und Straßenbahn-Schienenstücken vor Ort (!) noch immer die Methode schlechthin.

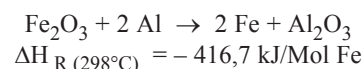
Nur bei der automatisierten Neuverlegung von Schienenstrecken kommt das zwar elektrisch betriebene, von einer Elektrifizierung der Strecke jedoch unabhängig durchführbare „Abtrennstumpfschweißen“ immer mehr zum Einsatz. Auf Österreichs Bahnstrecken stehen den rund 35.000 aluminothermischen Schweißungen pro Jahr nur rund 2000 Abtrennstumpfschweißungen gegenüber. Auch bei den Straßenbahnen wird der Anteil der Thermit-Schweißungen vor Ort auf 90 bis 95 % geschätzt.^{Ann.2}

Diese Angaben stehen ganz im Gegensatz zu einer Anmerkung in einer chemiedidaktischen Fachzeitschrift [16], der zufolge die „Hauptabsatzmärkte für das fertige Gemenge heute China und Indien seien, weil sich dort das heute *überwiegend* angewandte Elektroschweißen wegen der weiten nicht elektrifizierten Strecken verbietet.“

2. Verschulte Theorie und technische Praxis

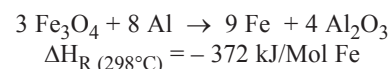
In den meisten Chemiebüchern wird für das Prinzip des Gießschmelzschweißens

Eisen(III)-oxid als Ausgangsmaterial angenommen. Zugegeben – die Reaktionsgleichung ist einfacher als die Gleichung mit Eisen(II,III)-oxid:



Auch die meisten Versuchsvorschriften in den diversen Experimentierbüchern verwenden Eisen(III)-oxid mit einem Schmelz- bzw. Zersetzungspunkt von 1.565 °C als Ausgangsmaterial (siehe Tab. 1).

Anhand einer handelsüblichen Thermitmischung („Elektrothermit-Schweißportion“[®]) lässt sich jedoch gut verifizieren (siehe Abschnitt Experimente), dass in der Technik praktisch ausschließlich Eisenhammerschlag (Fe₃O₄) als Eisenoxid-Komponente verwendet wird:



Bei der Reaktion mit Eisen(II,III)-oxid (Schmelzpunkt 1.538 °C) ist die errechnete Reaktionsenthalpie pro Mol Eisen etwas kleiner als bei der Reaktion mit Eisen(III)-oxid, wobei bei einer Bilanzierung der Energie auch noch die Schmelzwärmen der beteiligten Stoffe berücksichtigt werden müssten. In der Tat besteht jedoch beim AT-Schweißen die Gefahr, dass die Metallschmelze zu hohe Temperaturen erreicht, was durch Zusätze an Kühlschrott (fein gekörnter Stahl im Thermitgemisch) verhindert wird. Da die Reaktion in sehr kurzer Zeit abläuft und praktisch keine Gase freigesetzt werden, die nennenswerte Energien abführen könnten, kommen trotzdem sehr hohe Temperaturen (zwischen 2.200 bis 2.400 °C) zustande [15]. Bei diesen Temperaturen schmilzt das gebildete Aluminiumoxid als Schlacke (Schmelzpunkt von Korund Al₂O₃: 2.050 °C [15]) und sammelt sich schwimmend über dem flüssigen Eisen im speziell konstruierten Schmelztiegel, der heute auch als Einweg-Tiegel konzipiert sein kann.

Gleichzeitig legieren die im Thermitgemisch je nach Anwendung bereits enthaltenen Zusätze (Kohlenstoff, Mangan, Nickel, Chrom, Molybdän, Vanadin) mit der metallischen Phase. Nach einem authentischen Bericht [14] wird das aus 13 kg Thermit gebildete Produktgemisch etwa 2 Minuten (!) als Schmelze im Schmelztiegel zurückgehalten, damit sich

der Stahl von der Schlacke entsprechend trennen kann. Nur auf diese Weise kann die spezielle Einweg-Gussform, die unter dem Schmelztiegel um die zu schweißenen (auf ca. 700 bis 900 °C vorgewärmt) Schienenstücke positioniert wird, mit schlackenfreiem Stahl entsprechender Qualität gefüllt werden.

Wie aus der Reaktionsgleichung ersichtlich, sind für 3 Mol Hammerschlag (694,56 g) rein rechnerisch genau 8 Mol Aluminium (215,82 g) zu veranschlagen. In der Praxis verwendet man häufig einen geringen Unterschuss an Aluminium, um Al-Legierungen zu vermeiden. Aufgrund der ferromagnetischen Eigenschaften von Hammerschlag lässt sich eine käufliche Mischung mit einem starken Magnet – wie in [5] bereits beschrieben – überraschend gut vom Aluminiumgrieß trennen, sodass das Mengenverhältnis nach dem händischen Aussortieren von kleinen Metallsplittern (Schrott, Legierungskomponenten) durch einfache Wägungen eruiert werden kann (siehe Abbildungen). Tatsächlich wurden auf diese Weise aus 49,4 g Thermitgemisch 9,5 g grauglänzender Al-Grieß und – nach dem Aussortieren von 8,8 g an groben Metallsplittern mittels Pinzette und Lupe – 31,1 g Fe_3O_4 isoliert. Die stöchiometrische Menge für 9,5 g Al-Grieß wären 30,6 g Fe_3O_4 .

3. Kaufen statt selbst mischen

Zur Demonstration der Thermit-Reaktion im Rahmen der schulischen oder akademischen Ausbildung sind in der einschlägigen Literatur zahlreiche Versuchsvarianten beschrieben. In der Tabelle 1 wurden nur einige exemplarische Beispiele zusammengefasst.

Wenn selbst zubereitete Thermit-Mischungen bzw. improvisierte Zündmechanismen eingesetzt werden sollen, sind eine Reihe von Voraussetzungen zu erfüllen, um eine verlässliche und damit auch sichere Zündung zu gewährleisten. Dazu zählen je nach Versuchsvorschrift die richtige Konditionierung (z. B. Trocknung) des verwendeten Eisenoxids genauso wie die Wahl der richtigen Korngröße beim Aluminium bzw. die Verwendung der adäquaten Behältnisse und Zünder. Gute Experimentierbücher zeichnen sich dadurch aus, dass auf diese möglichen Fehlerquellen ausreichend hingewiesen wird (s. Tab. 1).

Auffällig oft werden in den diversen Versuchsvorschriften Hinweise dazu geliefert, was zu tun ist, wenn die Thermit-Mischung nach Ablauf der veranschlagten Startzeit nicht anspringt. Eigene Erfahrungen haben gezeigt, dass das Zünden der Thermit-Mischung mit improvisierten Mitteln tatsächlich zu Problemen führen kann. Auch wenn man nicht fälsch-

licherweise 30 g Eisenoxid mit 1 g (!) Al-Pulver mit einem Holzstäbchen ängstlich verrührt und dann mit einem Mg-Band zu zünden versucht, was in einer hospitierten Stunde natürlich gleich mehrmals fehlschlagen musste: „In der nächsten Stunde probieren wir den Versuch noch einmal – ich glaube da stimmt etwas nicht“ [1].

Vereinzelte Literaturhinweise zur Art des verwendeten Aluminiums wie „frischer“ Aluminiumgrieß [2, 6] oder Aluminiumgrieß ohne „Korrosions Spuren“ [7] bzw. der Vermerk in einer Versuchsvorschrift, dass das vielfach vorgeschlagene gepulverte Aluminium gar nicht funktioniert [10], deuten bereits auf beträchtliche Unsicherheiten bei der Vorbereitung des Experiments bzw. bei der Erfolgsquote hin. Offensichtlich kann oberflächlich (zu) stark oxidiertes Aluminium zeitraubende und für den Unterrichtsverlauf frustrierende Fehlschläge beim Starten der Reaktion bewirken.

Derartige Unwägbarkeiten bei der Zufuhr der notwendigen Aktivierungsenergie gefährden den ungeduldigen Experimentator, wenn dieser unter Zeit- und Erfolgsdruck den Zündversuch wiederholen will, obwohl das Gemisch etwas zeitverzögert gerade startet. Spezielle „Zündkirschen“ mit Mg-Pulver und Ba-Peroxid als Starter helfen zwar sehr spektakulär über derartige energetische „Startschwierigkeiten“ hinweg, Probleme ergeben sich jedoch wiederum bei der Zündung der brisanten Zündkirsche selbst. Beim Anbrennen dieser Zündkirschen mit einem senkrecht hineingesteckten Mg-Band kommt es immer wieder vor, dass sich das Mg-Band zwar am oberen Ende entzündet lässt, dann aber nicht wie eine Lunte zur Zündkirsche nach unten brennt. Ein brennendes Stück Magnesium fällt auf die Startermischung, bevor der Experimentator einen sicheren Abstand erreicht hat. Der relativ großen „Feuerhof“ der Mg-Pulver/Ba-Peroxid-Zündkirsche ist oft problematischer als die Thermit-Reaktion selbst.

Außerdem bereitet das Entzünden des vertikal positionierten Mg-Bandes mit dem Brenner dann Probleme, wenn es nicht ausreichend über den Rand des meist verwendeten Tontöpfchens hinausragt. Längere Mg-Bänder führen umgekehrt aber wieder dazu, dass sie nicht ausreichend in der Initialzündmischung bzw. im Thermitgemisch stabilisierbar sind und durch die Brennerflamme „umgeblasen“ werden, was ebenfalls zu einem gefährlichen weil vorzeitigen Abbrand der brisanten Initialzündung führt. Andererseits führt der Verzicht auf die brisante „Anfeuerung“ mit Magnesiumpulver und Ba-Peroxid immer wieder zu Fehlschlägen beim Start der Thermit-Reaktion. Mit normalen Wunderkerzen (Sternwerfern) aus (gealterten) weihnachtlichen Beständen

oder mit einem Mg-Band, das in ein Häufchen Mg-Pulver ragt, lassen sich Thermit-Gemische leider allzu oft nicht sofort zur Reaktion bringen. Die chemischen „Zeitzünder“ aus Kaliumpermanganat und Glycerin bzw. Kaliumchlorat, Zucker und Schwefelsäure brennen zwar selbst meist recht spektakulär an, die darunter befindliche Thermit-Mischung lässt sich aber auf Antrieb von diesem Angebot an Aktivierungsenergie auch nicht immer beeindrucken.

Einmal zur Reaktion gebracht, können selbst hergestellte Thermit-Mischungen in größerer Menge unter Umständen fulminanter reagieren, als ursprünglich geplant. Bei sorgfältig konditioniertem (!) Eisen(III)-oxid-Pulver und noch sehr „frischem“ (!) Al-Schliff, bei dem die feinen Partikel erst eine sehr dünne Oxidhaut besitzen, sind eben größere aktive Oberflächen verfügbar als bei Al-Grieß und Hammerschlag. Fertig käufliche Thermitmischungen aus grobschuppigem Hammerschlag, grobem Al-Grieß, Köhlschrott (!) und Legierungskomponenten schmelzen im kleinen Maßstab relativ „beruhigt“ auf. Unerwartete Stichflammen oder gar Verpuffungen wurden bei selbst bei mehreren tausend Zündungen in Portionen zwischen 150 – 180 g^{Ann.3} nicht beobachtet.

Da sowohl das fertige, beim AT-Schweißen verwendete Thermitgemisch als auch die original zugehörigen Thermit-Zündstäbchen im normalen Lehrmittelhandel^{Ann.4} sowie in einer einmaligen Aktion auch beim VCÖ erhältlich sind, sieht der Verfasser dieses Beitrags keine methodische Notwendigkeit, improvisierte Mischungen im Grunde unprofessionell zu zünden. Da die prinzipielle Zusammensetzung der Thermitmischung mit einfachsten Mitteln (mittels Magnet) auch aus der fertigen Mischung nachvollziehbar transparent gemacht werden kann, ergeben sich durch das Selbermischen der Komponenten auch keine didaktischen Vorteile. Im Gegenteil: Der größere Zeitbedarf in der Vorbereitung und die Unsicherheiten bei der Versuchsdurchführung sind eher ein Handicap. (s. Tab. 1)

4. Brisant aber präzise

Um die nunmehr mehrere tausendfach erprobten Portionen von 150 g bis 180 g Thermit (s.o.) im Blumentopf problemlos auch in Innenräumen zünden zu können, müssen die räumlichen Voraussetzungen gegeben sein bzw. die im experimentellen Teil dieses Beitrags aufgelisteten Anweisungen befolgt werden.

Es hat sich bewährt, diese Portionen zeitsparend ausschließlich mit konfektionierten Thermit-Zündstäbchen zu zünden. Diese eigens für die Thermitmischung konzipierten

Tabelle 1

Literatur	Art und Menge des Eisenoxids	Art und Menge des Aluminiums	Vorgeschlagene Art der Zündung
[2]	40 g Eisen(III)-oxid (getrocknet)	14 g Aluminium (Grieß, frisch)	Mg-Band
[3] Var. A	50-55 g Eisen(III)-oxid (pulv.)	15 g Aluminium (pulv.)	20-25 g KMnO_4 auf Thermitgemisch positioniert, mit 5-6 ml Glycerin versetzt
[3] Var. B	3 g Eisen(III)-oxid (pulv.)	1 g Aluminium (pulv.)	1 g KClO_3 mit 1 g Zucker vorsichtig gemischt, auf Thermitmischung positioniert, mit 1 Tropfen H_2SO_4 conc. versetzt
[4]	40 g Eisen(III)-oxid (pulv.) Alternativ: Fe_3O_4 in stöchiometrischer Menge Hinweis: Eisenoxid trocknen	13 g Aluminium (Grieß)	2 Wunderkerzen
[5] Var. A	79,85 g Eisen(III)-oxid (pulv.)	27,0 g Aluminium (Grieß) + 7,0 g CaF_2 als Flussmittel	Handelsübliche Thermit-Zündstäbchen, vor selbst hergestellten Zündmischungen wird gewarnt. Weiterer Hinweis: normale Wunderkerzen zünden nicht!
[5] Var. B	139,0 g Fe_3O_4	43,2 g Aluminium (Grieß) + 13,0 g CaF_2 als Flussmittel	Siehe Variante A
[6]	40 g Eisen(III)-oxid (pulv.) (getrocknet)	14 g Aluminium (Grieß, frisch, trocken)	Mg-Band oder Wunderkerze
[7] Var. A	50 g Eisen(III)-oxid (pulv.) (getrocknet)	18 g Aluminium (Grieß, ohne Korrosionsspuren)	3 g Magnesiumpulver, darauf 0,3 g fein gepulvertes KMnO_4 + 2 Tropfen angewärmtes Glycerin
[7] Var. B	50 g Fe_3O_4 (pulv.) (getrocknet)	16 g Aluminium (Grieß, ohne Korrosionsspuren)	Zündstäbchen für Thermitgemische
[8] Var. A	20 g Eisen(III)-oxid (pulv.) (ev. bei 150 °C getrocknet)	6 g Aluminium (Grieß, ev. bei 150°C getrocknet)	5 g Aluminiumpulver auf Thermitmischung, mit Mg-Band (10 cm Länge) in Gemisch gesteckt, gezündet
[8] Var. B	30 g handelsübliche Thermitmischung		Durch Hineinwerfen einer gezündeten Wunderkerze
[9]	250 g Eisen(III)-oxid oder Fe_3O_4 ; ev. bei 150 °C getrocknet	75g Aluminium (Grieß oder Pulver)	Brennender Sternwerfer (Wunderkerze)
[10] Var. A	50 g Eisen(III)oxid (trocken)	18 g Aluminium (Grieß, kein Pulver!)	2-3 g Magnesiumpulver, darauf 0,3 g KMnO_4 , darauf 1-2 Tropfen angewärmtes Glycerin
[10] Var. B	50 g Eisen-(II,III)-oxid (trocken)	16 g Aluminium (Grieß, kein Pulver!)	2-3 g Magnesiumpulver, darauf 0,3 g KMnO_4 , darauf 1-2 Tropfen angewärmtes Glycerin
[10] Var. C	50 g Eisen-(II,III)-oxid (trocken)	16 g Aluminium (Grieß, kein Pulver!)	10 g Bariumperoxid, 15 g Magnesiumpulver, vorsichtig in trockener Weithalsflasche gemischt, auf Thermitmischung deponiert, gezündet mit 10 cm langem Mg-Band
[11]	7,5 g Eisen(III)-oxid (vorgetrocknet)	2 g Aluminium (pulv.)	Mg-Pulver an den Rand der Thermitmischung gestreut und mit Bunsen-Flamme gezündet, vor einer Initialzündung mit Mg-Pulver und Ba-Peroxid wird ausdrücklich abgeraten
[12]	14,5 g Eisen(III)-oxid	5,2 g Aluminium (Grieß) vermischt mit 0,3 g Al-Pulver („Bronze“)	3,7 g BaO_2 vorsichtig vermischt mit 0,3 g Mg-Pulver, auf Thermitmischung positioniert, unterste Schicht der Zündmischung mit Spatel in Thermitmischung eingearbeitet; Zündmischung gezündet mit Lunte (Streifen Filterpapier 15x60 mm mit KNO_3 -Lösung ges. getränkt und getrocknet)
[13]	0,9 g Eisen(III)-oxid (trocken)	0,3 g fein gepulvertes Aluminium	Mg-Band, 4-5 cm Länge

Stäbchen sind letztlich auch nicht teurer, als eine „Lunte“ aus Mg-Band bzw. die Zündkirsche aus Mg-Pulver und Ba-Peroxid.

Die Zündstäbchen sehen ähnlich aus wie normale Wunderkerzen (Sternwerfer), sind aber wesentlich brisanter als diese und liefern für den Start der Thermit-Reaktion dementsprechend viel mehr Aktivierungsenergie. Während gewöhnliche Wunderkerzen kein Eisenoxid als Sauerstofflieferanten enthalten, reagiert das Thermit-Zündstäbchen^{Ann. 5} aufgrund der besonderen pyrotechnischen Zusammensetzung (53 % Ba-Nitrat, 20 % Al-Pulver, 15 % Eisen(III)-oxid, 12 % Dextrin) unter anderem bereits wie eine winzige Menge Thermit.

Zum Vergleich: Als charakteristische Rezeptur bei handelsüblichen Wunderkerzen für den Weihnachtsbaum werden 55 % Bariumnitrat, 5 % Aluminium- u. 25 % Eisen-Pulver sowie 15 % Dextrin als Bindemittel angegeben [15].

Die Existenz eines Bariumsalzes lässt sich mit schulischen Mitteln durch Zerkleinern und Extrahieren der am verkupferten Eisendraht aufgezogenen pyrotechnischen Mischung einfach nachweisen. Der wässrige Extrakt, auf einer Pt-Drahtöse in die Bunsenflamme gehalten, liefert eine kurze, aber eindeutig grüne Flamme. Mit verd. Schwefelsäure erhält man einen weißen Niederschlag von Ba-Sulfat. Quantitativ kann Nitrat und damit auch der Gehalt an Ba-Nitrat ermittelt werden, wenn man die zerkleinerte Mischung vor der Extraktion wiegt, in einem 100 ml Maßkolben mit 100 ml Wasser extrahiert, das Gemisch filtriert und nach entsprechender Verdünnung den Nitratgehalt z.B. mit dem RQFlex von Merck – wie in [19] bereits beschrieben – misst.

Obwohl der Abbrand dieser Thermit-Zündstäbchen im Vergleich zu normalen Wunderkerzen sehr viel heftiger verläuft, sind bei richtiger Handhabung selbst bei tausendfacher Nutzung keineswegs jene Probleme aufgetreten, wie sie von einem Kollegen in einer fachdidaktischen Zeitschrift beschrieben wurden [16]. Im Gegenteil: Wenn man das Zündstäbchen am Draht mit einem Lederhandschuh oder mit einem Reagenzglashalter so hält, dass die pyrotechnische Belegung nach unten weist und mit der spitzen Flamme eines Mikrobrenners^{Ann. 6} am unteren Ende entzündet werden kann, so hat man die weißglühend wegspritzenden Reaktionsprodukte gut unter Kontrolle. Das brennende Stäbchen kann auf diese Weise problemlos in die Thermit-Mischung gesteckt werden, die auch sofort reagiert (Schutzbrille nicht vergessen!). Soviel Zeit bleibt jedoch immer, um die Hand rasch zurückzuziehen und einige Schritte Sicherheitsabstand einzunehmen.

5. Thermolyse von Wasser in 60 Sekunden

Die Zündstäbchen für die Thermit-Mischung (Zusammensetzung s. o.) eröffnen für die Experimentalchemie in der Schule eine noch ganz andere Facette der vom Verfasser dieses Beitrags seit Jahren propagierten „INSTANT CHEMISTRY“ = Zeitsparende Schulchemie mit kleinen Mengen.

Selbst wenn die Unterrichtszeit drängt, so ist es mit diesen Stäbchen prinzipiell möglich, innerhalb einer Minute (inklusive Vor- und Nachbereitungszeit!) Wasserdampf auf jene Temperaturen zu bringen, bei der die thermische Zersetzung von Wasser in die Elemente Wasserstoff und Sauerstoff bereits relevante Dimensionen angenommen hat (siehe experimenteller Teil).

Weil der Abbrand des Thermit-Zündstäbchens (aufgrund der Reaktion zwischen Eisenoxid und Al) auf einem viel höheren Temperaturniveau als bei gewöhnlichen Weihnachtsbaum-Wunderkerzen abläuft, brennen diese Zündstäbchen – im Unterschied zu normalen Wunderkerzen (Zusammensetzung s.o.) – auch unter Wasser weiter. Dabei entstehen direkt am brennenden Stäbchen neben den Wasserdampfblasen mitunter auch Gasblasen mit einem brennbaren Gas, was an und knapp unter der Wasseroberfläche zu harmlosen Verpuffungen führt (siehe Titelbild dieser Zeitschrift).

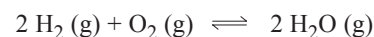
Auch wenn die brennbaren Anteile dieser Gasblasen nicht nur aus thermolytisch gewonnenen Wasserstoff, sondern auch noch teilweise aus brennbaren Pyrolyseprodukten des überschüssig vorhandenen organischen Bindemittels Dextrin bestehen sollten, so kann man aus dem auftretenden kleinen Verpuffungen erkennen, dass auch ein gasförmiges Oxidationsmittel vorhanden sein muss. Bei diesem gasförmigen Oxidationsmittel kann es sich nur um Sauerstoff handeln, der aus dem Wasser thermisch generiert wird.

Somit bieten diese Thermit-Stäbchen eine einzigartige und doch sehr simple Möglichkeit zu demonstrieren, dass Wasser auch thermisch zersetzt werden kann, dass die Bindungen in den Wassermolekülen jedoch sehr stabil sind, wenn es darum geht, diese thermisch spalten zu wollen.

Wie aus leidvoller Erfahrung in [20] berichtet wird, scheinen viele Versuchsvorschriften zur Thermolyse von Wasser in der chemiedidaktischen Literatur einfach von Buchgeneration zu Buchgeneration kritiklos übernommen worden zu sein, ohne nachzuprüfen, ob das Experiment in der beschriebenen Weise

auch tatsächlich nachvollziehbar ist.

Selbst bei den hohen Temperaturen beim Abbrand eines Thermit-Zündstäbchens lässt sich Wasser nur sehr eingeschränkt thermolysieren. Grundsätzlich können jedoch die theoretischen Überlegungen aus der spannenden Welt der Thermodynamik am lebensweltlichen Beispiel Wasser (siehe Gewinnung von Solarwasserstoff in Solarturmkraftwerken) experimentell belegt werden. Für die normalerweise so eindeutig exotherm und auch exergonisch verlaufende Knallgas-Reaktion:



gibt es grundsätzlich ein thermodynamisches Gleichgewicht, was für die Lernenden meist bereits eine geradezu ungeheuerliche Behauptung darstellt. Dieses Gleichgewicht liegt bei 25 °C natürlich überwältigend auf der Seite des Wasserdampfes. Die fast astronomisch große Gleichgewichtskonstante bringt dies auch rechnerisch zum Ausdruck:

$$K_p (298^\circ\text{C}) = \frac{p^2 [\text{H}_2\text{O}]}{p^2 [\text{H}_2] p [\text{O}_2]} = 1,33 \cdot 10^{80} \text{ bar}^{-1} [18]$$

Eine Abschätzung der thermisch beeinflussbaren Verschiebung dieses Gleichgewichtes ist mit dem Einsetzen der entsprechenden Daten in die bekannte van't Hoff'sche Näherungsgleichung rasch möglich, wenn die Standard-Reaktionsenthalpie für die Bildung von 2 Mol Wasserdampf ΔH^0 (= -482 kJ/2 Mol H₂O) der Einfachheit halber auch über den weiten Temperaturbereich als Konstante angesehen wird:

$$\ln K_p' - \ln K_p = \frac{\Delta H^0}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} \right)$$

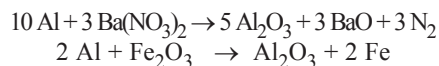
K_p' ist die neue gesuchte Gleichgewichtskonstante bei der neuen Temperatur T' , T die zur bekannten Konstante K_p (s.o.) zugehörige Temperatur (298 K), R steht für die Gaskonstante.

Wenn man davon ausgeht, dass ein Thermit-Zündstäbchen aufgrund seiner besonderen Zusammensetzung auch beim Eintauchen in Wasser Temperaturen von über 2.000 °C erreicht, so errechnet sich die neue Konstante K_p' durch Einsetzen von $T' = 2.273 \text{ K}$ mit etwa $5,3 \cdot 10^6 \text{ bar}^{-1}$. Dies bedeutet, dass selbst bei 2.000 °C im Gleichgewicht überwiegend Wasserdampf vorhanden ist: Für $K_p' = 5,3 \cdot 10^6 \cdot \text{bar}^{-1}$ erhält man rund 0,74 Volums% Wasserstoff, 0,37 % Sauerstoff und 98,9 % Wasserdampf, wenn man davon ausgeht,

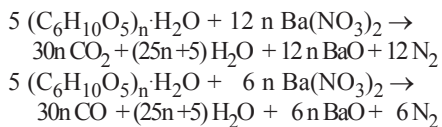
dass die Partialvolumina der Gase Wasserdampf, Wasserstoff und Sauerstoff auch den Partialdrücken im Gleichgewicht entsprechen.

Diese Werte stimmen recht gut mit den Angaben in der Literatur überein [17], derzufolge bei 2000 K (1.727 °C) nur 0,582 Massenprozent des Wasserdampfes in die Elemente gespalten ist. Die Umrechnung auf Vol% liefert bei dieser etwas tieferen Temperatur 0,58 Vo.% Wasserstoff, 0,29% Sauerstoff und 99,13% Wasserdampf.

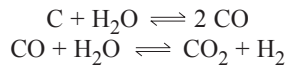
Aufgrund der Zusammensetzung sind beim Abbrand des Zündstäbchens eine Reihe von pyrotechnischen Reaktionen zu erwarten. Wesentliche Energielieferanten werden u. a. folgende Prozesse sein:



Rechnerisch werden für den Gehalt an 15 Massen% Eisen(III)-oxid in der Zündstäbchen-Masse etwa 5 Massen% Aluminium benötigt. Wenn man davon ausgeht, dass die restlichen 15 Massenprozent % an Aluminiumpulver entsprechend der obigen Gleichung von Bariumnitrat oxidiert werden müssen, dann wird bereits ein Großteil dieses Oxidationsmittels dafür verbraucht. Von der gesamten Menge an Bariumnitrat, die in der Zündstäbchen-Masse enthalten ist (53%), bleiben rechnerisch nur etwas über 11 % zur Oxidation des Bindemittels Dextrin. Selbst wenn man annimmt, dass nur ein Teil des organischen Kohlenstoffs vollständig zu Kohlendioxid umgesetzt wird und daneben auch noch Kohlenmonoxid entsteht, scheint die noch verfügbare Menge an Oxidationsmittel zur Oxidation des enthaltenen Bindemittels (12 % Dextrin) eher gering. Zur vollständigen Oxidation von 12 g Dextrin würde man rechnerisch fast 42 g Bariumnitrat benötigen:



Offensichtlich sind die pyrotechnischen Reaktionen beim Abbrand noch wesentlich komplexer, als bisher modellhaft skizziert. Wichtige Gleichgewichte, die bei den hohen Abbrandtemperaturen bereits eine Rolle spielen, wurden nicht berücksichtigt:



Trotz des hohen Anteils an Bariumnitrat sind die grünen Bereiche des Spektrums weder beim Abbrand von gewöhnlichen Wunderkerzen noch bei der Reaktion der Thermit-Zündstäbchen zu sehen. Dazu ist die Reaktionstemperatur vergleichsweise zu hoch. Vor allem fehlt aber die Möglichkeit Partikel des Typs Me-Cl zu bilden. Farbige Sternsätze und Theaterfeuer enthalten anstelle von metallischen Komponenten organische Stoffe (Akaroidharz, Schellack) und vor allem Chlordonatoren (Chlorat-Sätze, PVC, Perchlorat), die eine Farbtintensivierung erst ermöglichen [19].

6. Stahl und Schlacke

Bei der Durchführung der Thermit-Reaktion in der Schule mit vergleichsweise nur geringen Mengen an Ausgangsmaterial ist die Trennung von Schlacke und Eisen (bzw. Stahl) auf den ersten Blick nicht eindeutig beobachtbar. Dafür ist das Volumen der Schmelze zu gering und die Standzeit der flüssigen Phase im kleinen Tontopf zu kurz. Auch wenn man das Loch im Blumentopf nicht – wie häufig vorgeschlagen – nur mit Papier, sondern mit einem münzenförmigen Stück Kupfer/Aluminium (im Wert von 1 Schilling) oder mit einem münzenähnlichen Stück Aluminium (im Wert von 10 Groschen) verschließt. Es kommt nicht – wie bei der technischen Durchführung – zur eindeutigen Separation der Reaktionsprodukte im Tiegel. Vielmehr fließt ein Großteil der gesamten Schmelze gleich nach dem Start der Reaktion in das vorbereitete Sandbett (siehe experimenteller Teil).

Je kleiner der Ansatz ist, desto schwieriger ist es auch, das gebildete Eisen (bzw. den Stahl) und das Aluminiumoxid im Reaktionsprodukt zu identifizieren. Wird im Microscale-Maßstab mit nur 1,2 g Thermit-Mischung (!) gearbeitet, so muss ein Eisenbällchen mit nur 100 bis 150 mg Masse in der abgekühlten Schmelze gesucht werden [13].

Bei der Verwendung von (fertigen) Thermitmischungen im Schulbereich kann es deshalb beim Einsatz von zu geringen Mengen zu einem methodisch-didaktischem Problem kommen. Nach dem Start des Redoxprozesses rinnt das vorerst weißglühende Reaktionsprodukt zwar wie bei einem Hochofenabstich in das vorbereitete Sandbad, bei der erstarrten, dunklen Schmelze kann jedoch zwischen den Schlackenanteilen und dem Stahlregulus vorerst optisch nicht unterschieden werden. Eine globale Beurteilung des erstarrten Reaktionsproduktes auf Magnetisierbarkeit ist deshalb nicht stichhaltig, weil im handelsüblichen Ausgangsgemisch neben dem leicht erkennbaren silbrigen Al-Grieß und kleinen Körnchen an Legierungskomponenten bereits leicht magnetisierbares Eisen(II,III)-oxid vorliegt (siehe praktischer Teil).

Beim Einsatz von 150 g bis 180 g an handelsüblicher Thermitmischung gibt es jedoch bei richtiger Vorgangsweise (s. u.) neben einem spektakulären Versuchsverlauf auch noch ein eindeutiges Resultat bei der Identifizierung der Reaktionsprodukte.

Durch Zerschlagen der im Sandbad abgekühlten Schmelze mit einem Hammer – siehe auch [5] – lässt sich bei den zitierten Mengen praktisch immer ein massiger Klumpen an hellgrauem Stahl von der schwarzen und spezifisch leichteren Schlacke separieren.

Der kompakte, spezifisch schwerere Stahlklumpen mit einer Masse von etwa 60 bis 80 g erweist sich als sehr zäh und widerstandsfähig gegen ein Zerschlagen mit dem Hammer und ist gut magnetisierbar. (siehe Tab. 2).

Das durch eisenhaltige Verunreinigungen schwarz gefärbte Aluminiumoxid

Tabelle 2

Masse des Thermitgemisches [g]	Masse des Blumentopfes [g]	Masse der Schlacke im Topf [g]	Masse der Schlacke im Sandbad [g] (anhaftender Sand nur beschränkt entfernbar)	Masse des gebildeten Stahlregulus [g] (Schlacke abgeschlagen, gehämmert und gebürstet)	Volumen des Stahlregulus [cm ³] (bestimmt durch Wasser-Verdrängung)	Dichte des gebildeten Stahlregulus [g/cm ³]
180,0	149,1	13,8	90,8	78,7	10,5	7,5
160,0	149,5	27,5	71,2	68,4	9,5	7,2
150,0	149,8	21,5	80,7	56,8	8,5	6,7

Zum Vergleich: Dichte von Korund: 3,9 – 4,1 g/cm³; Dichte von Eisen: 7,86 g/cm³

kann an seiner vergleichsweise deutlich geringeren Dichte, am muscheligen Bruch und an seiner Härte erkannt werden. Korund hat immerhin die Härte 9 [15]. Tatsächlich kann man mit der beim Thermit-Versuch gewinnbaren Schlacke Glas ritzen, wie das bereits in [5] kurz erwähnt ist. Scharfkantige Bruchstücke funktionieren ganz ausgezeichnet als Glasschneider beim Kürzen von AR-Glasrohren oder Teilen von gläsernen Objektträgern und Glasplatten (siehe Abbildung).

7. Experimenteller Teil

7.1. Versuche mit den Thermit-Zündstäbchen

7.1.1. Qualitative Prüfung der pyrotechnischen Mischung auf Barium und Nitrat Material und Chemikalien:

Thermit-Zündstäbchen, Reibschale u. Pistill, Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Spatel, Pt-Draht, Brenner, dest. Wasser, Nitrat-Teststäbchen

Versuchsdurchführung:

Die pyrotechnische Mischung eines Thermitzündstäbchens wird in einer Reibschale durch Zerdrücken vom Draht gelöst und zerkleinert. Das Pulver wird in ein Reagenzglas transferiert, etwa 10 cm hoch mit dest. Wasser übergossen und durch Schütteln extrahiert. Nachdem sich die unlöslichen Anteile großteils gesetzt haben, taucht man einen ausgeglühten Pt-Draht in den Extrakt und hält dann einen Tropfen in die nicht leuchtende Flamme eines Bunsenbrenners. Für den Nachweis der Barium-Ionen als Bariumsulfat-Niederschlag werden einige Tropfen des einigermaßen klaren Extrakts mit verd. Schwefelsäure versetzt.

Die Prüfung aus Nitrat wird durch Eintauchen eines Nitrat-Teststäbchens in die Extraktions-Lösung vorgenommen.

Ergebnis:

Nach dem Verdampfen des Tropfens in der Pt-Drahtöse leuchtet die Bunsenflamme charakteristisch grün auf. Beim Versetzen der Extraktionslösung mit verd. Schwefelsäure entsteht ein weißer Niederschlag von Bariumsulfat. Der Nitrat-Nachweis mit den Test-Stäbchen ist positiv.

7.1.2. Quantitative Bestimmung des Gehaltes an Bariumnitrat

Material:

Thermit-Zündstäbchen, Reibschale, Pistill, Spatel, Waage (Genauigkeit mind. 0,01g), 1000-ml-Maßkolben, dest. Wasser RQ-flex® mit Reflektquant-Teststäbchen Merck Nr. 16995 für Nitrat

Versuchsdurchführung:

Die pyrotechnische Mischung wird vom Zündstäbchen wie unter 7.1.1. gelöst und zerkleinert. Zwischen 0,25 und 0,30 g des

gut pulverisierten Gemisches werden auf 0,01 g genau abgewogen, in einen 1000ml-Maßkolben transferiert, mit 1000 ml dest. Wasser versetzt und durch Schütteln sorgfältig extrahiert. Nachdem sich die unlöslichen Anteile großteils wieder gesetzt haben, eignet sich die überstehende Lösung direkt zur reflektometrischen Messung des Nitrats mit dem RQflex®.

Ergebnis:

Bei einer Einwaage von 0,25 g an pyrotechnischer Mischung liefert die Nitrat-Messung Werte von rund 62 mg/Liter Extraktionslösung. 62 mg Nitrat stehen zur Menge an Ba-Nitrat im Molmassenverhältnis $2 \text{ NO}_3^- : \text{Ba}(\text{NO}_3)_2 = 2 \times 62 \text{ mg} : 261,33 \text{ mg}$. Aus 62 mg Nitrat (extrahierbar aus 0,25 g Probe) resultieren somit: $124 : 261,33 = 62 : x$; $x = 130 \text{ mg}$ Barium-Nitrat (= 52 % der Einwaage).

7.1.3. Nachweis von Eisen(III)-Ionen in der Zündstäbchenmischung

Material:

Thermit-Zündstäbchen, Reibschale, Pistill, Spatel, Reagenzglas, Brenner, HCl conc., dest. Wasser, Kaliumthiocyanat, Kaliumhexacyanoferrat-(II)

Versuchsdurchführung:

Die pyrotechnische Masse des Thermit-Zündstäbchens wird mittels Reibschale und Pistill zerkleinert. Eine Spatelspitze des Pulvers wird in ein Reagenzglas transferiert, mit einigen Tropfen konz. Salzsäure versetzt und kurz erhitzt. Das Gemisch wird ca. 5 cm hoch mit dest. Wasser überschichtet. Man lässt das Gemisch etwa eine Minute absetzen, dekantiert einige Tropfen der Lösung in ein anderes Reagenzglas und versetzt mit den Reagenzien (KSCN-Lösung bzw. $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ -Lösung).

Ergebnis:

Beim Versetzen der Lösung mit Thiocyanat entsteht eine blutrote Lösung, beim Versetzen mit Hexacyanoferrat(II) bildet sich ein blauer Charge-Transfer-Komplex.

7.1.4. Thermolyse von Wasser – die Thermit-Zündstäbchen als UW-Fackel

Material:

1-Liter-Weckglas oder 400 ml-Becherglas (hohe Form), warmes Wasser, Thermit-Zündstäbchen, Reagenzglashalter, Mikrobrenner, Schutzhandschuh, Schutzbrille, feuerfeste Unterlage

Versuchsdurchführung:

Das 400 ml-Becherglas wird zu zwei Drittel mit Wasser gefüllt. Man hält das Zündstäbchen mittels Reagenzglashalter am Draht mit dem Brandsatz nach unten gerichtet, entzündet das unterste Ende des Stäbchens mit der spitzen Flamme des Mikrobrenners, lässt wenige Sekunden anbrennen und versenkt dann das brennende Stäbchen langsam im (warmen)

Wasser. Wenn die Reaktion unter Wasser schwächer wird, muss man das Stäbchen wieder weiter aus dem Wasser herausziehen. Wenn die Reaktion ganz aufhört, ist das auch kein Problem: Auch halb abgebrannte, nasse Stäbchen lassen sich mittels Mikrobrenner am untersten Ende gleich wieder entzünden.

Als Alternative zum 400 ml-Becherglas, das mit der Zeit durch glühende (Metall-) Partikel in Mitleidenschaft gezogen wird, bietet sich ein kostengünstigeres 1-Liter-Weckglas an, das einfach ersetzt wird, wenn es sich nicht mehr ausreichend reinigen lässt.

Ergebnis:

Das Stäbchen brennt unter Wasser weiter. An der bewegten Wasseroberfläche gibt es immer wieder kleine Stichflammen, darauf hindeuten, dass die aufsteigenden Gasblasen nicht nur Wasserdampf, sondern (entsprechend dem Temperaturniveau von über 2000 °C) auch Wasserstoff, Sauerstoff und ev. brennbare Zersetzungsprodukte des Bindemittels enthalten. (siehe Titelbild)

7.2. Experimenteller Teil – Versuche mit der Thermitmischung

7.2.1. Trennung der Thermitmischung in Al-Grieff und ferromagnetische Bestandteile

Material:

Waage (Genauigkeit 0,1 g), Thermitmischung, 3 Petrischalen, mehrere Rundfilter, starker Magnet (Cow Magnet: <http://www.teachersource.com/catalog/index.html>)

Versuchsdurchführung:

40 bis 40 g der Thermitmischung werden auf 0,1 g genau abgewogen und auf einem Rundfilter ausgebreitet. Mit einem starken Magnet (Nd-Magnet, Cow Magnet, starker Hufeisenmagnet) kann man die ferromagnetischen Anteile nun recht gut vom Al-Grieff trennen. Leichtes Klopfen am Magnet bewirkt, dass an den Hammerschlag-Schuppen ev. anhaftende Al-Körnchen abfallen. Durch die völlig unterschiedliche Färbung ist die Abtrennung der ferromagnetischen Teilchen vom Al-Grieff optisch gut verfolgbar. Wenn der Magnet schon ziemlich beladen ist, dann wird das abgetrennte Produkt auf einem Filterpapier abgestreift. Die auf diese Weise gewonnenen Fraktion an Al-Grieff wird gewogen. (s. Abb. 1)

Ergebnis:

Aus 50 g käuflicher Thermit-Mischung lässt sich etwas mehr als 9,5 g Al-Grieff abtrennen.

7.2.2. Trennung der ferromagnetischen Bestandteile in Hammerschlag und Legierungskomponenten

Material:

Fraktion aus Versuch 7.2.1., Pinzette, Filterpapier, Lupe

Versuchsdurchführung:

Mittels Pinzette und Lupe wird die aus Versuch 7.2.1. gewonnene ferromagnetische Fraktion händisch vom „Kühlschrott“ und von den Legierungsbestandteilen getrennt. Zu diesem Zweck breitet man das Gemisch auf einem Filterpapier flach aus. Die auszusortierenden Stückchen sind meist deutlich größer als die Hammerschlag-Schuppen und unterscheiden sich auch farblich. Die Fraktionen werden auf zwei Filterpapieren gesammelt und gewogen. (s. Abb. 2)

Ergebnis:

Innerhalb von 10 Minuten gelingt es, die im Versuch 7.2.1. gewonnene ferromagnetische Fraktion von den Legierungsbestandteilen soweit zu trennen, dass von der ursprünglichen Thermitmenge (50 g, siehe Versuch 7.2.1) nur noch etwas mehr als 31 g schuppiges Eisen(II,III)-oxid verbleiben. Den Rest bilden diverse Metallstückchen.

Das Massenverhältnis der gewonnenen Fraktionen an Eisen(II,III)-oxid aus Versuch 7.2.2. und Aluminiumgrieß aus Versuch 7.2.1. entspricht recht gut den stöchiometrischem Verhältnis.

7.2.3. Die Thermit-Reaktion in 2 Minuten

Material:

Käufliches Thermit-Gemisch („Elektrothermit-Schweißportion“, Bezugsquelle: siehe PHYWE Systemkatalog Chemie, S. 362, Fa. Gatt-Koller, A-6060 Absam, Swarovskistr. 74 bzw. Aktion des VCÖ), Blumentopf aus Ton (Höhe 8,5 cm, obere Gesamtbreite 8,7 cm), Stativplatte, Stativstange, 2 Stativringe (1 Ring etwas kleiner als der Durchmesser des Tontopf-Bodens) 2 Muffen, verzinkter Blecheimer (mind. 12 Liter Fassungsvermögen, ca. 30 cm Öffnungsdurchmesser, halb gefüllt mit trockenem Sand), Thermit-Zündstäbchen (Fa. Comet; Bezugsquelle: siehe Thermit-Gemisch), Reagenzglashalter, Mikrobrenner (Bezugsquelle s. VCÖ-Shop), Münze aus Aluminium oder Kupfer, Schutzbrille

Versuchsdurchführung (Indoor-Version):

Entsprechend dem Motto: „150 Gramm Thermit in geringer Entfernung als Indoor-Versuch gezündet, sind für die Zuschauer spektakulärer als die zehnfache Menge in großem Abstand bei grellem Tageslicht im Schulhof zur Reaktion gebracht“, werden in diesem Beitrag nur Anweisungen zur Durchführung des Experimentes in Innenräumen gegeben.

Das Stativ mit der max. 1 m langen Stativstange wird auf einem Fliesen- bzw. Steinboden ^{Anm. 7} so positioniert, dass in einem Abstand von mindestens 2 m rund um den Standort keine brennbaren Gegenstände und Materialien vorhanden sind.

Die zwei Stativringe werden mit den Muffen so an der Stativstange so befestigt,

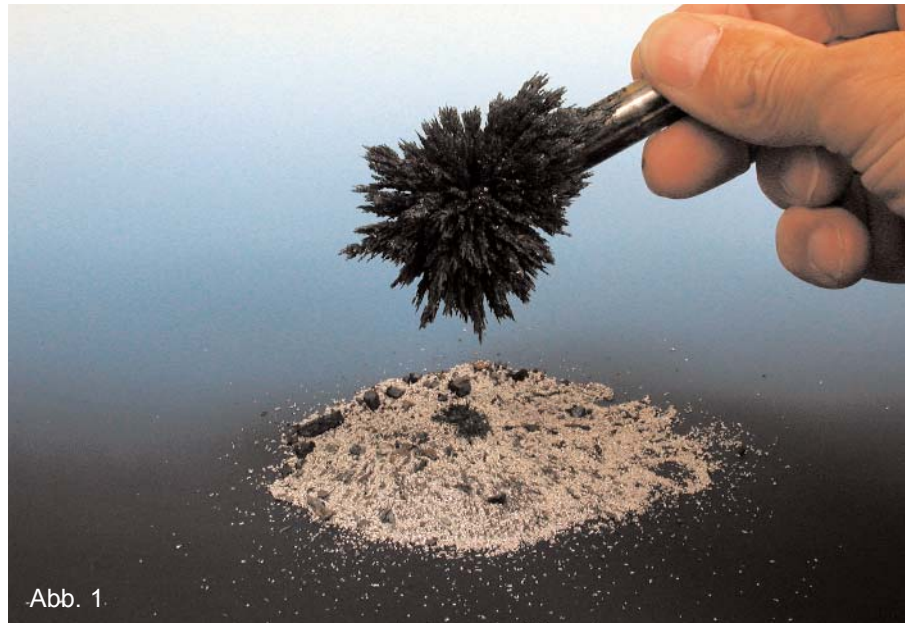


Abb. 1



Abb. 2

dass der Blumentopf zentrisch über den darunter zu stellenden Blecheimer positioniert werden kann. Der untere Stativring muss etwas kleiner als der Boden des Blumentopfes sein, sodass der Topf auf diesen Ring aufgesetzt werden kann. Dies ist besonders dann wichtig, wenn keine Al-Münze sondern eine Cu/Al-Münze zum Verschließen des Lochs im Topfboden verwendet wird. Durch die um etwa eine Sekunde längere Standzeit der Schmelze im „Einweg-Tiegel“ hält dieser den Temperaturen nicht immer stand, so dass der untere Teil des Tiegels samt der Schmelze mitunter ins Sandbad stürzen würde, wenn der Tiegelboden nicht abgestützt ist. Dieser „Durchbruch“ des Tiegels ist zwar nicht gefährlich, aber es gibt nicht das spektakuläre, über mehrere Sekunden andauernde Ausfließen der Schmelze in den Eimer hinein.

Der zweite, größere Stativring umschließt den oberen Rand des Blumentopfes und verhindert ein Kippen bzw. ein totales Bersten. Bei Indoor-Experimenten hat es sich bewährt, den

Blumentopf in einer Höhe zu fixieren, in der sich der Topfboden nicht mehr als rund 40 cm über dem oberen Rand des Blecheimers befindet.

Der Eimer muss bis ca. zur Hälfte so mit Sand gefüllt sein, dass sich die geschmolzenen Reaktionsprodukte in der Mitte des Kübels in einer vorgeformten Vertiefung sammeln können. Die geschmolzenen Eisen- und Schlackenanteile sollten nicht seitlich zur Kübelwand abfließen und diese unter Umständen durchschmelzen können.

Das Loch im Boden des nach Vorschrift dimensionierten Blumentopfes wird mit einer Münze (Al oder Cu/Al) verschlossen und 3 bis maximal 4 cm hoch (150 g bis 180 g) mit Thermit-Mischung gefüllt.

Wenn alle brennbaren Gegenstände (auch der Thermit-Vorratsbehälter und die Zündstäbchen!) aus dem potentiellen Gefahrenbereich (Radius etwa 2 – 3 m) entfernt sind, kann man die Reaktion mittels Thermit-Zündstäbchen in Gang setzen.

Dazu hält man das Thermit-Zündstäbchen mit einem Reagenzglasal-

ter am Draht unbedingt so, dass die pyrotechnische Belegung nach unten weist. Mittels Mikrobrenner wird nun das Stäbchen am untersten Ende entzündet. Sofort setzt eine heftige Reaktion ein und die weißglühend wegspritzenden Reaktionsprodukte würden auf die ev. ungeschützte Hand gelangen, wenn man das Stäbchen mit der pyrotechnischen Mischung nach oben oder die zweite Hand unter das brennende Stäbchen halten würde.

Das brennende Zündstäbchen taucht man nun in den Blumentopf und drückt es leicht in das Thermit-Gemisch. Im gleichen Augenblick zieht man die Hand zurück und nimmt sofort einen sicheren Abstand zum Kübel (2 – 3 Schritte entfernt) ein.

Ergebnis:

Bei Einhaltung der genau beschriebenen Prozedur gibt es keinen Start-Versager. Bei mehreren tausend (!) Wiederholungen im Rahmen von Schauvorführungen hat es sich gezeigt, dass Schutzhandschuhe gar nicht unbedingt notwendig sind, wenn man gelernt hat, das Abbrandverhalten von Zünder und Thermitmischung richtig einzuschätzen. Auf das Tragen der Schutzbrille darf jedoch trotzdem nicht vergessen werden. Das Thermit-Gemisch reagiert innerhalb von Sekunden, es entsteht unter Funkensprühen eine weißglühende Schmelze, die nach wenigen Augenblicken Standzeit im Tontopf in den bereitgestellten Sand fließt (s. Abb. 2a). Wenn meist – schon nach wenigen Sekunden – keine Funken mehr aus Tontopf und Sandbad sprühen, kann man die Lernenden (mit Schutzbrille) so nahe an den Kübel heran lassen, dass die Strahlungswärme der noch rotglühenden Masse registriert werden kann.

7.2.4. Untersuchung des gewonnenen Eisens (Metallglanz, Magnetisierbarkeit, Dichte)

Material:

Abgekühlte Schmelze aus Versuch 7.2.3., Hammer, Amboss (bzw. großer Schraubstock, Baumarktware), Tiegelzange, Feile, Magnet, 100 ml-Spritze (Kunststoff), Wasser, Waage (Genauigkeit 0,01 g).

Versuchsdurchführung:

Die erstarrte und erkaltete (bzw. auch mit Wasser abgekühlte) Schmelze aus Stahlregulus und Schlacke wird am Amboss (ev. Schraubstock) kräftig bearbeitet. Die spröde Schlacke zerspringt unter den Hammerschlägen, es kommt ein zäher, grauer-schwarzer, meist 3 bis 4 cm großer Klumpen zum Vorschein. (s. Abb. 3) Wenn man die Oberfläche mit einer Feile glättet, so wird der Metallglanz sofort sichtbar.

Mit einem starken Magnet kann man den Unterschied in der Magnetisierbarkeit zwischen Schlacke und Eisenregulus leicht feststellen. Nach intensivem Behämmern wird die Masse des trockenen Stahlklumpens bzw. das Volumen durch Wasserverdrängung bestimmt. Dazu benötigt man nicht unbedingt einen teuren und bruchgefährdeten Messzylinder aus Glas. Man entfernt den Stempel einer 100 ml-Kunststoffspritze, verschließt den Kathederansatz mit dem Luer-Adapter bzw. mit Hilfe einer Nadel, die in einem Gummistopfen steckt, stellt den Spritzenkörper senkrecht und füllt bis zur 50ml-Marke Wasser ein. Nun lässt man die Probe (ohne Wasser zu verspritzen – bei schräg gehaltenem Spritzenkörper) in den improvisierten Messzylinder gleiten und ermittelt den Anstieg des Flüssigkeitsspiegels auf etwa 0,5 ml genau. (s. Abb. 4)

Ergebnis:

Je mehr Thermit-Mischung zur Reaktion gebracht wird, desto näher liegen die Dichte-Werte des erhaltenen Eisens (bzw. Stahl) beim theoretischen Wert (siehe Tab. 2). Ein kleinerer Regulus hat eine vergleichsweise größere Oberfläche,



Abb. 2a

wo nicht entfernbare Schlackeneinschlüsse eben häufiger auftreten.

7.2.5. Prüfung der Schlacke auf Härte und Magnetisierbarkeit

Material:

Erkaltete Schlacke aus Versuch 7.2.4., starker Magnet, Objektträger oder kleine Glasplatten, Glasrohre

Versuchsdurchführung:

Die beim Versuch 7.2.4. separierte Schlacke wird mit einem Magnet auf Magnetisierbarkeit getestet, wobei vor allem die dünnen, scharfkantigen Krusten aus der Oberfläche der erstarrten



Abb. 3

Schmelze fast gar keine Affinität zum Magnet mehr zeigen.

Die scharfkantigen Krustenstücke lassen sich wie ein Glasschneider zum Ritzen von Glasrohren und Glasplatten verwenden. (s. Abb. 5)

8. Zusammenfassung

Der Thermit-Versuch funktioniert am verlässlichsten mit käuflichen Komponenten, wobei die Durchführung unter den beschriebenen Voraussetzungen auch in größeren Innenräumen problemlos möglich ist. Was in den vergangenen Monaten im Rahmen von tausenden (!) Schauvorführungen unter definierten Bedingungen so oft erprobt werden konnte, wie wohl kein anderes Schulexperiment bisher.

Ausgehend von der physikalischen und chemischen Untersuchung der fertigen Thermit-Mischung, des Zündstäbchens und der Reaktionsprodukte eröffnen sich eine Reihe von Möglichkeiten, fachliche Fragestellungen (Stofftrennung, Stoffeigenschaften Metall, Nichtmetall, Chemische Reaktion und Energetik, Redoxprozesse, Stöchiometrie, Analytik usw.) im Kontext zu einem Verfahren mit sehr großer praktischer Bedeutung zu sehen.

Wenn einmal der geeignet dimensionierte Blechkübel mit Sand (Lagerhausware) bzw. ein entsprechender Vorrat an Zündstäbchen, Thermitmischung und passenden Tontöpfen angeschafft wurde und zusammen mit dem Stativ mit den fix montierten Stativringen als „Thermitversuch-Set“ in der Sammlung bereitgehalten wird, dauert die eigentliche Durchführung des Experimentes inklusive Vor- und Nachbereitung maximal zwei bis drei Minuten. Das Experiment zählt somit in der beschriebenen Form zur Kategorie der „Instant Chemistry-Versuche®“. Trotz der größeren eingesetzten Mengen ergeben sich keine Abfall- und auch keine Reinigungsprobleme, weil die festen Reaktionsprodukte inert sind und mit dem „Einweg-Reaktionsgefäß“ einfach der Restmüllfraktion zugeordnet werden können. Bei entsprechend guten Kontakten zum Bautrupps der Bundesbahnen oder den Straßenbahn-Verkehrsbetrieben oder im Rahmen der VCÖ-Aktion sind die verwendeten Materialien selbst in größerer Menge so kostengünstig, dass eines der spektakulärsten Experimente, das es in der experimentellen Schulchemie überhaupt gibt, zusätzlich mit dem Attribut „Low-Cost-Reaktion“ ausgezeichnet werden kann.

Literatur:

[1] E. Graf, Hospitiert und kommentiert: Thermitverfahren – Eine lehrreiche Stunde (für Unterrichtende) – wenn auch missglückt. In: *Chem.Sch.* **44** (1997) 7/8, S. 266

[2] E. Graf, Hospitiert und kommentiert: Das „Thermitverfahren“ im problemorientierten Unterricht. In: *Chem.Sch.* **44** (1997) 10, S. 354

[3] B. Shakhshiri, *Chemical Demonstrations A Handbook for Teachers of Chemistry*, Vol 1, University of Wisconsin Press, Madison 1983, S. 85

[4] P. Haupt, Das Thermitverfahren – ein Redoxvorgang in der Technik. In: *NiU-Chemie* **2** (1991), Nr. 8, S. 35

[5] D. Gräf, Erfahrungen mit dem Thermitverfahren. In: *NiU-Chemie* **2** (1991), Nr. 8, S. 39

[6] W. Geiger, P. Haupt, R. Kloppert, W. Kunze, *CVK Chemie für die Sekundarstufe 1, Arbeits- und Informationsbuch*, 1. Auflage 1994, Cornelsen Verlag Berlin, S. 78

[7] H. Boeck (Hrsg.), *Chemische Schulexperimente, Band 1 Anorganische Chemie*, Volk und Wissen Verlag Berlin 1998, S. 310,

[8] H.W. Roesky, K. Möckel, *Chemische Kabinettstücke*, VCH Weinheim 1994, S. 59

[9] F.R. Kreißl, O. Krätz, *Feuer und Flamme, Schall und Rauch*, Wiley-VCH Weinheim 1999, S. 88

[10] H. Keune, W. Filbry (Hrsg.), *Chemische Schulexperimente, Band 2, Anorganische Chemie, erster Teil*, 2. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt/M. 1986, S. 174

[11] F. Bukatsch, W. Glöckner (Hrsg.), *Experimentelle Schulchemie, Anorganische Chemie Metalle*, Studienausgabe in 9 Bänden, Band 3, Verlag Aulis Deubner&CO KG, Köln 1977, S. 26

[12] H. Brüning, Thermit-Versuch, In: *PdN-Ch* **49** (2000), Heft 1, S. 21

[13] F.J. Arnáiz, R. Aguado, S. Arnáiz, Microscale Thermit Reactions. In: *J.Chem.Ed.* **75** (1998), Nr. 12, S. 1630



Abb. 4

[14] A. L. Feliu, Thermit Welding Gets High School Chemistry Class on Track. In: *J.Chem. Ed.* **78** (2001), Nr. 1, S. 15

[15] J. FALBE, M. REGITZ (Hrsg.): *CD Römpp Chemie Lexikon – Version 1.0*, Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag, 1995

[16] P. Heinzerling, Praxistipp zum Thermit-Versuch. In: *PdN-ChiS* **50** (2001), Nr. 4 S. 28

[17] A.F. Holleman, E. Wiberg, *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*, 81. – 90. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin 1976

[18] R. E. Dickerson, I. Geis, *Chemie – eine lebendige und anschauliche Einführung*, VCH Weinheim 1990, S. 332

[19] V. Obendrauf, Von Knallteufeln und Knatterfontänen, Experimente mit pyrotechnischem Spielzeug. In: *Chem. Sch. (Salzbg.)* **14** (1999), Nr. 4, S. 22-28

[20] B. Frieße, Thermolyse von Wasser – ein alter Versuch in neuem Gewand. In: *NiU-Chemie* **7** (1996) Nr. 36, S. 14



Abb. 5

Anmerkungen:

- ¹ „ALCHEMIE – Der Traum vom Gold“, Ausstellung mit chemischen bzw. alchemistischen Vorführungen auf Burg Rabenstein, A-8130 Frohnleiten, Steiermark, Mai-Oktober 2001
- ² Auskunft Elektrothermit P C Wagner 23, Erlaaer Str 118, 1230 Wien
- ³ 150 g – 180 g Thermit-Gemisch ergeben in einem Ton-Blumentopf (Höhe 8,5 cm, obere Gesamtbreite 8,7 cm) eine Füllhöhe von etwa 3 bis 4 cm. Diese Portionen wurden als spektakuläres Indoor-Experiment im Zeitraum Mai bis September 2001 ohne jeden Zwischenfall bei

Schauvorführungen im Rahmen einer Ausstellung auf Burg Rabenstein in der Nähe von Graz mehrere tausend Male gezündet.

- ⁴ Siehe: PHYWE Systemkatalog Chemie, Seite 362 (Fa. Gatt-Koller, A-6060 Absam, Swarovskistr. 74)
- ⁵ Fa. Comet GmbH, Pyrotechnik, Vieländer Weg 147, 27574 Bremerhaven
- ⁶ Microflam-Brenner Proxxon, siehe Aktion des VCÖ
- ⁷ Wenn der Fußboden diese Anforderungen nicht erfüllt und z. B. ein schöner Holz- bzw. PVC-Boden gegen herumspritzende, noch glühende kleine Metallteilchen geschützt werden soll, kann man in guten Teppichgeschäften fündig werden:

Der Verfasser dieses Beitrages hat für den mobilen Einsatz ein Reststück eines schwer entflammaren Teppichbodens (Brandklasse B1 nach DIN 4102 in der Größe von 3 mal 3 Meter) günstig erworben und bereits mehrmals beim Thermit-Versuch als Schutzabdeckung verwendet, ohne dass am Gewebe sichtbare Schäden aufgetreten sind.

*Viktor Obendrauf ist Professor an den Pädagogischen Akademien in Eggenberg und Graz, Hasnerplatz 12, A-8010 Graz.
email: v_obendrauf@mail.styria.com*