Hochtemperaturchemie im Haushalts-Mikrowellenofen

Arnim Lühken und Hans Joachim Bader

HOCHTEMPERATURCHEMIE ist ein Gebiet, das dem Experimentalunterricht bisher weitgehend verschlossen ist. Mit Gas- und Gebläsebrennern lassen sich Reaktionstemperaturen von 900 bis 1.000 °C nur unter hohem Zeitaufwand erzielen. Labormuffelöfen erreichen zwar Temperaturen bis 1.200 °C, der hohe Preis (> 2.000 DM) und die Aufheizdauer (15 bis 110 Minuten) stehen der Anschaffung und dem Einsatz im Chemieunterricht jedoch entgegen. Darüber hinaus lässt sich der Reaktionsansatz während der Durchführung nicht beobachten.

Durch eine neue Technik ist es allerdings möglich, Tiegeltemperaturen bis 1.400 °C unter Verwendung eines haushaltsüblichen Mikrowellenofens zu erreichen. Dabei liegt die Aufheizrate des Tiegels bei etwa 1.000 °C in der ersten Minute. Grundlegende Hochtemperaturprozesse wie z.B. die Reduktion von Eisenoxid mit Kohlenstoff, die Glasherstellung und die Darstellung von anorganischen Farbpigmenten und Metalllegierungen sind auf diese Weise in kurzer Zeit (2 bis 10 Minuten) durchführbar. Da Haushaltsmikrowellen preisgünstig in der Anschaffung sind, durch die Experimente nicht beschädigt und kaum verunreinigt werden, eignet sich das Verfahren nicht nur für den Laborbetrieb, sondern ebenfalls sehr gut für den Einsatz im Chemieunterricht.

Der vorliegende Beitrag führt zunächst in die Thematik der Mikrowellenerwärmung ein, anschließend werden die Methoden und die praktische Umsetzung der Hochtemperaturerzeugung im Mikrowellenofen beschrieben. Eine Auswahl von Versuchsbeschreibungen zeigt Anwendungsmöglichkeiten für den Experimentalunterricht auf. ⟶

Stichworte: Mikrowellen · Hochtemperaturchemie

1. Einleitung

In den meisten Küchen findet man heute einen Mikrowellenofen - umgangssprachlich kurz *Mikrowelle* genannt - zum Erwärmen von Speisen und Getränken. Den meisten Benutzern sind aber die physikalischen Eigenschaften der eingesetzten elektromagnetischen Strahlung und die physikalisch-chemischen Wirkungen der Mikrowellenenergie nicht näher bekannt.

Höchstes Interesse gewinnt die Mikrowellenerwärmung in jüngster Zeit im Bereich der Hochtemperaturtechnik unter anderem zum Sintern von Keramiken oder Beschichten von Materialoberflächen. Allerdings ist hier noch sehr viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten.

2. Fachliche Grundlagen

Kurz gefasst ist elektromagnetische Strahlung Energie, die von bewegten elektrischen Ladungen abgegeben wird und sich als Welle im Raum ausbreitet. Mit zunehmendem Energieinhalt nimmt dabei die Wellenlänge der Strahlung ab. Liegt die Wellenlänge im Bereich von 1 mm bis 1 m (entsprechend dem Frequenzbereich von 300 MHz bis 300 GHz), spricht man von *Mikrowellen*. Der Haushalts-Mikrowellenofen erzeugt Strahlung mit einer Festfrequenz von 2,45 GHz. Im gesamten Spektrum liegt die Mikrowellenstrahlung zwischen den Radiowellen (1 m bis 10^4 m) und der Wärmestrahlung bzw. dem Infrarot (760 nm bis 0,5 mm).

Mikrowellenstrahlung entsteht z.B. bei elektrischen Entladungsvorgängen (Gewitter). Auch Mensch und Tier geben neben Wärmestrahlung messbare Leistungen im Mikrowellenbereich ab [1]. Technisch kann man Mikrowellen mit einem Magnetron erzeugen. Dabei handelt es sich um einen als Laufzeitröhre bezeichneten Sender, in dem von einer zylindrischen Glühkathode Elektronen emittiert und zu einer umgebenden, hülsenförmigen Anode beschleunigt werden. Auf ihrer Flugbahn werden die Elektronen von einem senkrecht stehenden Magnetfeld durch die dabei auftretende Lorentz-Kraft abgelenkt. Dadurch gelangen die Elektronen tangential an die in spezieller Weise konstruierte Anodenfläche, so dass sie dort Resonanzschwingungen erzeugen. In einem komplizierten Schwingkreis wird schließlich Mikrowellenstrahlung von einer Antenne des Magnetrons abgestrahlt [2]. Mikrowellen breiten sich wie jede elektromagnetische Strahlung im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit aus, jedoch werden sie unter anderem an Metalloberflächen reflektiert. Aufgrund dieser Eigenschaft kann Mikrowellenstrahlung durch Metallbleche und schon durch feinmaschige Drahtnetze wirksam abgeschirmt werden. Das Blechgehäuse und das gelochte Frontblech des haushaltsüblichen Mikrowellenofens gewährleisten eben diese sichere Abschirmung (Abb. 1). Mikrowellenstrahlung kann also nur dann die nähere Umgebung des Gerätes erreichen, wenn die Ofentür während des Betriebs nicht fest verschlossen ist. Moderne Ofenkonstruktionen schließen diese Möglichkeit jedoch aus [3].

Hans Joachim Bader, Jahrgang 1946, ist Professor für Didaktik der Chemie an der Universität Frankfurt. Nach dem Studium der Chemie und Promotion im Fach Organische Chemie in Frankfurt erfolgte 1984 die Habilitation im Fach Didaktik der Chemie an der Universität Bielefeld. Von 1986-1991 war er Professor an der Universität Erlangen-Nürnberg, 1992 folgte er dem Ruf auf eine C4 Professur an der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt.

Arbeitsgebiete: Entwicklung von Unterrichtskonzeptionen mit anwendungs- und gegenwartsbezogenen Inhalten, wie etwa die Einführung der Themenkreise Nachwachsende Rohstoffe, Recycling oder Arzneimittel in den Chemieunterricht; neue Ansätze in der Lehrerfortbildung und der Chemieausbildung von Medizinstudierenden.

Arnim Lühken, Jahrgang 1974, ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Didaktik der Chemie der Universität Frankfurt. Nach dem Grundstudium Chemie an der Universität Mainz wechselte er 1996 an die Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, nahm dort das Studium der Chemie und Biologie für das Lehramt an Gymnasien auf und schloss dieses 1999 mit dem 1. Staatsexamen ab. Seit Januar 2000 ist er im Arbeitskreis von Prof. Dr. Hans Joachim Bader mit den Arbeiten an seiner Dissertation beschäftigt.

Anschrift:
Prof. Dr. Hans Joachim Bader und Arnim Lühken, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, Institut für Didaktik der Chemie
Marie-Curie- Str. 11, 60439 Frankfurt am Main

CHEMKON *(Weinh.) © WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69451 Weinheim, 2001*
0944-5846/01/0101-007 $ 17.50 + .50/0

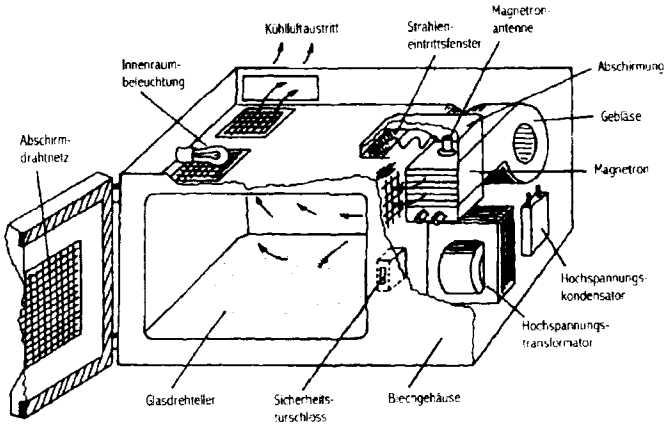

Abb. 1: Funktionsbauteile eines Haushalts-Mikowellenofens (verändert nach [4])

Die Erwärmung verschiedener Materialien und Substanzen durch das von Mikrowellen verursachte elektromagnetische Wechselfeld beruht auf Anregung der Rotationsschwingungen dipolarer Moleküle bzw. Elektronenanregung, insbesondere der delokalisierten Elektronen von Metallen. Die Anregbarkeit ist stoffspezifisch und wird als *Suszeptibilität* bezeichnet. Maßgebend für die Erwärmbarkeit eines Materials im Mikrowellenfeld sind auch dessen Oberflächenbeschaffenheit, Oberflächen-Volumen-Verhältnis und Homogenität.

Beim Erhitzen von Speisen und Getränken im Mikrowellenofen werden Molekülschwingungen der Inhaltsstoffe mit polarer Struktur, vor allem von Wasser, angeregt. Die Mikrowellenstrahlung dringt dabei jedoch nur einige Millimeter tief in das zu erhitzende Gut ein. Die tiefer gehende, vollständige Erwärmung erfolgt durch Wärmeleitung bzw. Konvektion.

Werden Metallgegenstände mit großer, spitzer oder scharfkantiger Oberfläche im Mikrowellenofen der Strahlung ausgesetzt, reicht deren Leitfähigkeit meist nicht aus, die Elektronenanregungsenergie ausreichend abzuleiten und es kommt zu Funkenentladungen. Aus diesem Grund dürfen z.B. keine Teller mit Goldrand oder mit Metallteilen ausgestattete Gefäße in der Mikrowelle verwendet werden.

3. Gesundheitliche Gefahren durch Mikrowellenstrahlung und Betriebssicherheit von Mikrowellenöfen

Die unkontrollierte Erwärmung von Körpergeweben durch Mikrowellenstrahlung wird spätestens seit der „Handyrevolution" wieder intensiv diskutiert. Gleichzeitig gewinnt die Mikrowellenerhitzung von Lebensmitteln und Materialien in Industrie und Haushalt rasch an Bedeutung.

Zunächst ist die Intensität bzw. Strahlungsleistung das Kriterium für die Beurteilung gesundheitsgefährdender Wirkungen von Mikrowellen. Während in der therapeutischen Medizin Mikrowellen der Frequenz 2,45 GHz und einer Intensität von einigen 100 mW/cm² zur lokalen Wärmebehandlung von Körpergeweben eingesetzt werden, führt eine Ganzkörperbestrahlung bei der selben Intensität bereits nach wenigen Minuten zu einem stark erhöhten Infarkt- und Arteriosklerose risiko. Dieses Risiko entsteht durch übermäßige, direkte Erwärmung von tiefer gelegenen Geweben, die sich aufgrund ihres hohen Wassergehalts bei Mikrowellenbestrahlung schneller erhitzen als die relativ wasserarmen, oberen Gewebeschichten der Haut. In diesen liegen jedoch die Thermorezeptoren, die für eine der Erwärmung adäquate Wärmeableitung ins Körperinnere sorgen. Sie erhalten keinen ausreichenden Temperaturreiz und so kommt es zu einer verzögerten und unzureichenden Temperaturregelung in den bestrahlten Körpergeweben [1].

In Deutschland gilt für die Bevölkerung ein begrenzender Richtwert für die Stahlenbelastung durch Mikrowellen von 0,2 mW/cm². Die für die private Nutzung angebotenen Mikrowellenöfen sind sog. geschlossene Strahlungsquellen. Das Metallgehäuse mit dem durch Perforation teildurchsichtig gemachten Türblech schirmt die Umgebung von der Mikrowellenstrahlung soweit ab, dass die Abstrahlung bei neuen Geräten unter 5 mW/cm² in 5 cm Entfernung liegt [5]. Das Gehäuse des Mikrowellenofens darf nicht verändert oder beschädigt werden (z.B. Einbohren eines Lochs), da es sonst zum Austritt von Leckstrahlung kommen kann. Möchte man sich selbst von der Betriebssicherheit des verwendeten Mikrowellenofens überzeugen, lohnt sich die Anschaffung eines Mikrowellen-Leck-Testers, der preiswert in Elektronik-Fachgeschäften erhältlich ist.

Um eine zu hohe Strahlungsintensität und Schädigung der Magnetronantenne durch Reflexionsstrahlung zu vermeiden, soll sich bei Betrieb im Ofenraum ein strahlungsabsorbierender Körper befinden. Dies wird beim Erwärmen von Speisen und Getränken durch deren Wassergehalt gewährleistet. Im Experimentalteil dieses Beitrags werden jedoch fast ausnahmslos Versuche beschrieben, bei denen unter Ausschluss von Wasser graphitischer Kohlenstoff bzw. Schmelzen angeregt und dadurch erhitzt werden. Eine Schädigung des Magnetrons, messbare Leckstrahlung oder eine übermäßige Erhitzung trat bei unseren Versuchsdurchführungen bisher nicht auf, obwohl im erhitzten Tiegel Temperaturen bis zu 1.400 °C erreicht werden.

In einigen Fällen kann es beim Bestrahlen von pulverisierten Reaktionsmischungen im Tiegel zum Aufstieg von Staub- oder Rauchfahnen bis hin zur Flammenbildung durch Gasionisation kommen. Die Mikrowelle ist dann abzuschalten und der Tiegel zunächst vor der weiteren Mikrowellenerhitzung abzudecken. Entflammbare Substanzen und Lösungsmittel dürfen nicht in offenen Gefäßen im Mikrowellenofen erhitzt werden, da entstehende Dämpfe durch die stromführenden Bauteile des Geräts zur Explosion gebracht werden können. Solche Stoffe dürfen nur in zugelassenen Spezialdruckbehältern aus Teflon mikrowellenerhitzt werden.

4. Einführende Versuche

Zunächst werden in einigen einfachen, aber dennoch zum Teil sehr spektakulären Experimenten die Eigenschaften und Besonderheiten des von Haushaltsmikrowellen erzeugten Mikrowellenfeldes gezeigt. Allgemein demonstrieren diese Versuche Anregungsphänomene der Mikrowellenstrahlung, die im Grundlagenteil angesprochen wurden.

Der Einfluss des Wassergehalts auf die Erwärmungsgeschwindigkeit von Lebensmitteln im Mikrowellenofen zeigt sich am Schmelzverhalten verschiedener Fettprodukte. Im folgenden Versuch wird die Schmelzdauer von Halbfett-Butter, Butter und wasserfreiem Fritierfett gemessen und verglichen.

Versuch 1: *Mikrowellenerhitzung verschiedener Fettprodukte*

Geräte und Chemikalien: Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), 3 Bechergläser (250 mL), Messer, 3 Uhrgläser (∅ 9 cm), Waage, Halbfett-Butter, Butter, Fritierfett

Durchführung: Von jedem der drei Fettprodukte werden 50 g im Stück in je ein Becherglas abgewogen und mit einem Uhrglas abgedeckt. Die Proben werden hintereinander im Mikrowellenofen bei maximaler Leistungsstufe erhitzt. Bei allen Versuchsdurchläufen soll sich das Becherglas an gleicher Stelle mittig auf dem Glasdrehteller der Mikrowelle befinden. Es wird die Zeit bis zur vollständigen Schmelze gemessen.

Beobachtungen und Auswertung: Als Durchschnittswerte ergeben sich:

	Wassergehalt	Schmelzdauer
Halbfett-Butter	60 %	20 s
Butter	15 %	40 s
Fritierfett	0 %	70 s

Die gering polaren Fettmoleküle werden durch Mikrowellenstrahlung nur wenig angeregt. Die Erwärmung beruht also wesentlich auf dem Wassergehalt der Fettprodukte. Je höher der Wasseranteil, desto schneller erwärmt sich die Probe. Im Vergleich zum konventionellen Erhitzen auf der Heizplatte erreicht man im Mikrowellenofen eine weitaus homogenere und damit schnellere Erwärmung des gesamten Kochguts.

Die Wärmeübertragung beim Erhitzen zeigt Vers. 2: Überschichtet man eine gesättigte Kupfersulfatlösung mit Wasser und erwärmt einmal auf der Heizplatte, einmal in der Mikrowelle, kann man das unterschiedliche Konvektionsverhalten dieses Zwei-Phasen-Systems gut beobachten.

Versuch 2: *Erwärmen eines Zwei-Phasen-Systems in der Mikrowelle und auf der Heizplatte*

Geräte und Chemikalien: Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), 2 Bechergläser (150 mL, hohe Form), Kolbenpipette (25 mL), Heizplatte, 2 Glasstäbe, Kupfersulfat-Lösung, $c(CuSO_4 \cdot 5\ H_2O)$ = ca. 1,2 mol/L, destilliertes Wasser

Durchführung: Mit einer Kolben-Messpipette werden in zwei Bechergläsern je 80 mL Wasser mit 20 mL Kupfersulfat-Lösung vorsichtig unterschichtet. Eine Probe wird auf der Heizplatte, die andere im Mikrowellenofen zum Sieden erhitzt. In jede Lösung wird ein Glasstab gestellt, um Siedeverzüge zu verhindern. Man misst die Zeit bis zum Sieden und beobachtet den Fortgang der Phasendurchmischung.

Beobachtungen und Auswertung: Durch vorsichtiges Unterschichten erhält man ein Zwei-Phasen-System mit der tiefblauen Kupfersulfat-Lösung als Unterphase. Beim Erhitzen auf der Heizplatte lassen sich kurz vor Beginn des Siedens aufsteigende Konzentrationsschlieren aufgrund von Wärmekonvektion beobachten. Die Phasentrennung bleibt dennoch bis zum Beginn des Siedens weitgehend stabil. Dann kommt es jedoch schnell zur Durchmischung durch aufsteigende Gasblasen. Im Unterschied dazu bleibt im mikrowellenerhitzten System die Phasentrennung auch nach Siedebeginn noch einige Zeit erhalten. Es ist nur das Aufsteigen von wenigen Gasblasen zu beobachten. Der Inhalt des Becherglases siedet nach kürzerer Zeit und im Vergleich ruhiger, was auf eine gleichmäßigere Erhitzung des Flüssigkeitsvolumens schließen lässt.

Ein gleichmäßiges Erhitzen im Mikrowellenofen hängt zum einen von der Polarität und Struktur des Kochguts, zum anderen von der Homogenität des Mikrowellenfelds ab. Im Ofenraum kommt es jedoch durch Reflexion der Mikrowellen an den Innenwänden zu Interferenzen, was zu einem inhomogenen elektromagnetischen Feld führt. Mikrowellenfelder von Haushaltsmikrowellen zeigen daher Bereiche vollständiger Feldlöschung einerseits und andererseits sog. *hot spots*, das sind Bereiche erhöhter Strahlungsintensität. Dieses Problem wird technisch z.B. durch Einbau eines Glasdrehtellers gelöst, auf dem das zu erhitzende Gut kontinuierlich durch die Löschungszonen und *hot spots* bewegt und so homogen erhitzt wird.

Versuch 3: *Nachweis der Inhomogenität des Mikrowellenfelds eines Haushalts-Mikrowellenofens*

Geräte und Chemikalien: Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), 2 *Styropor*®-Platten, Papiertücher, Thermo-Faxpapier, Sprühpistole, Wasser

Durchführung: Versuchsteil A: Eine *Styropor*®-Platte wird auf den Durchmesser des Drehtellers der Mikrowelle zugeschnitten und mit einem Papiertuch bedeckt, das mit Wasser aus der Sprühpistole durchfeuchtet wird. Auf das Papiertuch wird das Thermo-Faxpapier glatt aufgelegt. Die so präparierte Platte wird auf den Drehteller in den Ofeninnenraum gelegt. Die Ofentür wird geschlossen und die Mikrowelle bei maximaler Leistung gerade so lange eingeschaltet, dass sich eine Schwärzung auf dem Faxpapier abzuzeichnen beginnt.

Versuchsteil B: Eine zweite *Styropor*®-Platte wird auf das Grundflächenmaß des Ofeninnenraums zugeschnitten. Weiterhin wird wie im Versuchsteil A beschrieben verfahren, jedoch wird die Platte auf den Boden des Mikrowellen-Innenraums gelegt, aus dem der Glasdrehteller zuvor entfernt wurde.

Beobachtungen und Auswertung: Nach etwa 5 s beginnt sich bei beiden Teilversuchen das Thermo-Faxpapier in Bereichen rasch schwarz zu färben. Im ersten Versuch erkennt man deutlich eine breitflächige, ringförmige Schwärzung des Faxpapiers um die Drehachse des Glastellers. Im zweiten Versuch ergibt sich ein für das benutzte Mikrowellengerät charakteristisches, reproduzierbares Muster von punkt- und bandförmigen Schwärzungsbereichen.

In den *hot spot*-Zonen des inhomogenen Mikrowellenfelds erhitzt sich das feuchte Papiertuch sehr viel schneller, und Wasser verdampft hier früher als in den übrigen Flächenbereichen des Tuchs. Der heiße Wasserdampf verursacht die Schwärzung des Thermopapiers.

Beim Gebrauch der Haushaltsmikrowelle ist neben der Dipol- auch die Elektronenanregung von Bedeutung, denn letztere kann gefährliche Funkenentladungen mit Brandgefahr im Ofenraum verursachen (s.o.). Gefahrlos und dennoch sehr eindrucksvoll kann die Mikrowellenanregung des „Elektronengases" dünner Metallschichten an einer CD (*Compact Disc*) demonstriert werden [6].

Versuch 4: *Die CD in der Mikrowelle*

Geräte und Chemikalien: Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), CD

Durchführung: Die CD wird mit der nicht bedruckten Seite nach oben mittig auf den Glasdrehteller in den Ofen gelegt. Die Mikrowelle wird bei maximaler Leistung eingeschaltet, jedoch nicht länger als 5 s da es sonst schnell zur Pyrolyse des Kunststoffs kommt.

Beobachtungen und Auswertung: Kurz nach Einschalten der Mikrowelle leuchtet die CD unregelmäßig, aber heftig auf. Das für elektrische Funkenentladungen typische Zischen ist zu hören. Die dünne Aluminiumbedampfung zwischen Trägerscheibe und Lackschicht der CD wird im Mikrowellenfeld elektronisch so stark angeregt, dass sie schließlich verglüht. Dies geschieht allerdings nicht gleichmäßig. Das Abbrennen der Metallbedampfung beginnt vielmehr an zahlreichen Stellen durch spontan auftretende Zündfunken. Diese breiten sich in Sekundenbruchteilen unter Ausbildung von Funkenstrecken über die gesamte Fläche der CD aus. Dieser Abbrand hinterlässt charakteristische Schmorspuren auf dem Kunststoffträger, die ein filigranes, fraktalähnliches Muster bilden. Die CD ist nach dieser „Behandlung" nicht mehr brauchbar.

Im Gaszustand können eine Reihe chemischer Elemente durch Mikrowellenanregung so stark erhitzt werden, dass der „vierte Aggregatzustand", der Plasmazustand, erreicht wird. Die Atome liegen nun großenteils ionisiert vor. Im absoluten Plasma sind die Elektronen der Atomhüllen vollständig von den Kernen getrennt. Der Plasmazustand ist äußerst instabil und es erfolgt sehr schnell die Wiedervereinigung der angeregten Elektronen mit dem Atomrumpf. Dabei wird zum Teil elektromagnetische Energie im UV-Vis-Bereich emittiert.

In einem einfachen Experiment lässt sich ein Schwefel- und Iodplasma in einer Glaskugel im Mikrowellenofen erzeugen. Im Ergebnis erhält man so eine elektrodenlose Plasmaentladungslampe [7].

Versuch 5: *Erzeugung eines Schwefel- und Iodplasmas*

Geräte und Chemikalien: Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), 2 Gaswägekugeln (500 mL, Duran®), Kristallisierschale (⌀ 9 cm), Blumendraht, Vakuumpumpe, Iod (sublimiert), Schwefel (Schwefelblüte)

Durchführung: In die eine Gaswägekugel bringt man mit Hilfe des Blumendrahts etwa die Menge einer Spatelspitze Schwefelblüte, in die zweite Kugel etwa drei kleine Iodkristalle. Beide Kugeln werden 5 min mit einer Vakuumpumpe auf einen Restdruck von ca. 0,1 mbar evakuiert. Jeweils eine der beiden „Plasmalampen" wird genau mittig auf dem Glasdrehteller im Mikrowellenofen positioniert (Kristallisierschale als Auflage verwenden!) und höchstens eine halbe min lang bei maximaler Mikrowellenleistung bestrahlt. Der Versuch wird bei verschiedenen Leistungsstufen des Mikrowellenofens wiederholt.

Beobachtungen und Auswertung: Nach ca. 10 s Bestrahlung der „Schwefellampe" kommt es zu einem hellen, flackernden Aufleuchten. Die Lichtemission nimmt im Verlauf weiterer 5 s stark zu und bricht dann unvermittelt ab. Die „Iodlampe" zündet im Vergleich früher, die Lichtemission ist über längere Zeit stabil. Die Emissionsspektren liegen im blau-violetten Bereich (Abb. 2). Schwefel bzw. Iod wird durch Mikrowellenanregung zunächst verdampft. Die Moleküle dissoziieren und ionisieren, der Plasmazustand wird erreicht. Bei der gleichzeitig ablaufenden Plasmaentladung wird Licht- und Wärmeenergie frei.

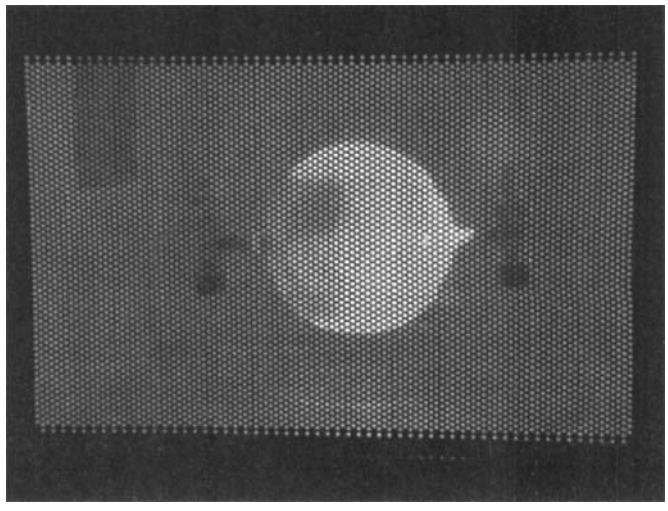

Abb. 2: Lichtemission eines Iodplasmas im Mikrowellenofen

In diesem Versuch kann außerdem die Funktionsweise von Haushalts-Mikrowellenöfen genauer nachvollzogen werden: Da das Magnetron eine feste Mikrowellen-Sendeleistung hat, kann die Mikrowellenintensität im Ofenraum nur zeitlich gemittelt durch die Pulsdauer, d.h. durch die Dauer des Ein- und Abschaltintervalls des Magnetrons, verändert werden. Bei dieser Betriebsart können die Versuche etwa 1 min betrieben werden. Das unterschiedliche Ein- und Abschaltintervall der Leistungsstufen kann am Einsetzen bzw. Erlöschen des Plasmaleuchtens festgestellt werden.

Hinweise: Die Gaswägekugel darf während des Mikrowellenbetriebs die Innenwand des Ofens zu keiner Zeit berühren. Die Glaswände der Kugeln heizen sich während des Versuchs sehr stark auf – Vorsicht beim Herausnehmen der Kugel!

5. Erzeugung hoher Temperaturen unter Verwendung von Aktivkohle und Graphit als Suszeptoren

Wird gekörnte Aktivkohle in einem Mikrowellenofen bestrahlt, glüht die Kohle bereits nach kurzer Zeit auf. In einer Minute wird nach Angabe von Mingos und Baghurst eine Temperatur von 1.283 °C (bei 1.000 Watt) erreicht [4]. Die sehr guten Eigenschaften von Aktivkohle als Suszeptor – also als Stoff, der sich von Mikrowellenstrahlung anregen lässt – erklären sich durch das teilweise delokalisierte Elektronensystem und den hohen elektrischen Innenwiderstand aufgrund der ausgeprägten Porenstruktur.

Dieser bekannte Effekt – den man weniger stark ausgeprägt etwa auch bei einigen Carbiden und Metalloxiden beobachten kann [3] – motivierte uns Wege zu suchen, die erzeugten hohen Temperaturen nutzbar zu machen. Fehlschläge brachten zunächst Experimente mit pulverförmiger Aktivkohle, da es durch unkontrollierte thermische Effekte immer wieder zu Stauberup-

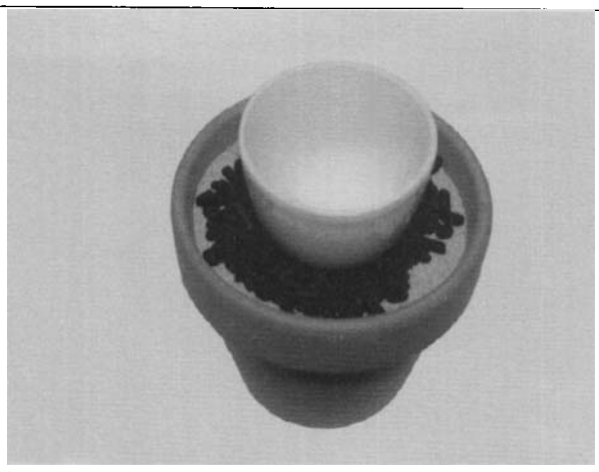

Abb. 3: Gekörnte Aktivkohle als Suszeptor

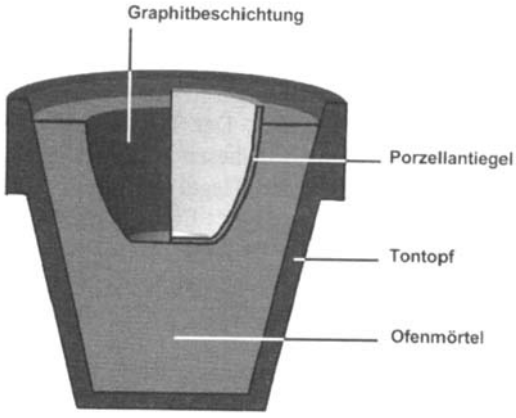

Abb. 4: *GST*-Element im Querschnitt

tionen kommt, die den Ofen verschmutzen. Eine erste Lösung des Problems ergab sich mit der abgebildeten Versuchsanordnung (Abb. 3). Als Reaktionsgefäß wird ein Schmelztiegel aus Porzellan oder besser aus Quarzglas verwendet. Dieser wird in gekörnte Aktivkohle eingebettet. Die Aktivkohle wiederum ist in einer Sandmulde aufgeschüttet. Obwohl Kohle und Tiegel nach Einschalten der Mikrowelle schnell zum Glühen kommen, ist die Erwärmung der Ofeninnenwände und des Frontblechs durch Hitzeabstrahlung nach einer Betriebsdauer von etwa 10 min unkritisch. Da jedoch auch das Sandbad sehr heiß wird, darf es nicht direkt auf den Glasdrehteller gestellt werden. Als stabile und feuerfeste Unterlage eignet sich ein Gasbetonstein. Dieser lässt sich mit einfachem Werkzeug auf die erforderlichen Kantenmaße (z.B. 6 cm x 6 cm x 3 cm) zuschneiden. Der Aufbau wird im Mikrowellenofen ohne Drehteller in einen Bereich hoher Strahlungsintensität gestellt (vergleiche dazu Vers. 3).

Die beschriebene Versuchsanordnung hat jedoch den Nachteil, dass die Aktivkohle vor einer erneuten Versuchsdurchführung durch Sieben vom Sang getrennt und frisch aufgeschüttet werden muss.

Als wesentlich besser handhabbar erweist sich eine weiterentwickelte Methode, die wir als Graphit-Suszeptor-Tiegel-Technik (*GST*-Technik) bezeichnen. Ausgangspunkt ist die sehr gute Suszeptibilität des graphitischen Kohlenstoffs, die auf die leichte Anregbarkeit der delokalisierten π-Elektronen der sp^2-hybridisierten Kohlenstoffatome zurückzuführen ist. Die elektrische Leitfähigkeit ist bei Graphit-Einkristallen stark anisotrop: Parallel zu den Schichten der C-Atome beträgt sie $2{,}8 \cdot 10^4\ \Omega^{-1}cm^{-1}$, senkrecht dazu $5\ \Omega^{-1}cm^{-1}$. Durch die dennoch gegebene relativ gute elektrische Leitfähigkeit können größere polykristalline Graphitkörper wie etwa Tiegel durch Mikrowellen nur langsam erwärmt werden. Allerdings konnten wir beobachten, dass sich sehr dünne Graphitschichten bei Mikrowellenanregung äußerst schnell aufheizen. Der Effekt beruht wahrscheinlich auf dem steigenden elektrischen Widerstand bei sinkendem schichttiefem Querschnitt.

Das Grundprinzip der *GST*-Technik besteht nun darin, dass eine den Tiegel umgebende hochtemperaturbeständige Form mit einer dünnen Graphitschicht überzogen wird (Abb. 4). Da unter Mikrowellenanregung diese Schicht sehr schnell abbrennen würde, muss die Form am Tiegel dicht anliegen. Für die Herstellung der feuerfesten Form benötigt man lediglich ein Graphitspray, einen kleinen Blumentopf und Ofenmörtel. Das Verfahren ist damit sehr preiswert durchzuführen. Anstelle des Sprays kann auch mit einer Suspension von Graphitpulver in Isopropanol gearbeitet werden, die mit einem Pinsel aufgetragen wird.

Herstellung der Tiegelform

Materialien: Ofenmörtel, Tonblumentopf (100 mL), Porzellantiegel (20 mL, mittelhohe Form), Hammer, Schraubenzieher, (evtl. Einmalhandschuh oder Frischhaltefolie), Spatel, Trockenschrank, Graphitspray

Arbeitsgang (vgl. Abb. 5):

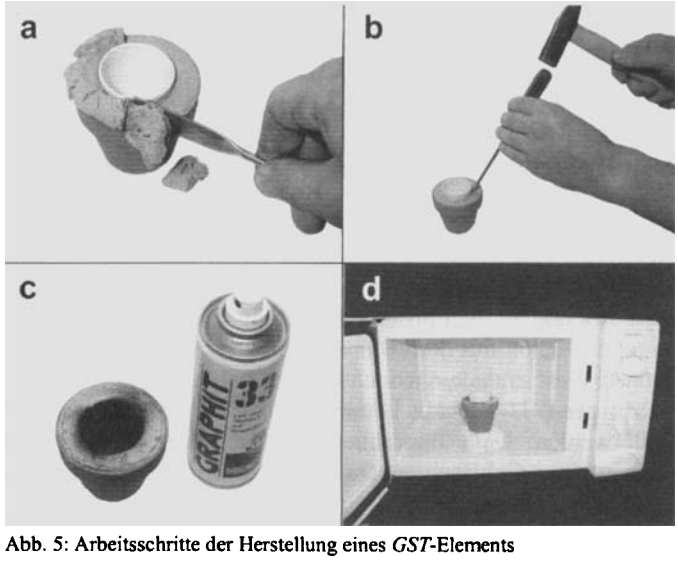

Abb. 5: Arbeitsschritte der Herstellung eines *GST*-Elements

Der Mörtel wird nach Anweisung des Herstellers mit Wasser zu einer pastösen Masse angerührt und in den Tontopf gefüllt. In den Mörtel wird der Porzellantiegel tief eingedrückt, überschüssiges Material bis zur Oberkante des Tontopfs mit dem Spatel glatt abgezogen (Abb. 5 a). Den Mörtel lässt man

abbinden und trocknen (im Trockenschrank bei ca. 80 °C über Nacht). Zum Entfernen des Porzellantiegels aus der Form wird der Schraubenzieher an verschiedenen Positionen der Randlinie zwischen Tiegel und Mörtel angesetzt und mit dem Hammer leicht eingeschlagen (Abb. 5 b). Der Tiegel lässt sich danach leicht aus der Form lösen. Auf diesen Arbeitsschritt kann verzichtet werden, wenn man den Tiegel vor dem Eindrücken in die Mörtelmasse in den Finger eines Einmalhandschuhs oder in Frischhaltefolie verpackt. Es ist dabei darauf zu achten, dass keine Falten entstehen. Ist der Mörtel völlig getrocknet, wird die Mörteloberfläche der Tiegelhöhlung mehrmals mit Graphit besprüht (Abb. 5 c).

Zur Durchführung von Versuchen wird das *GST*-Element auf einen Gasbetonstein in den Mikrowellenofen ohne Drehteller in einen Bereich hoher Strahlungsintensität (vgl. Vers. 3) gestellt (Abb. 5 d).

6. Experimentelle Einführung der *GST*-Technik

Bisher wurden Experimente zu den folgenden Themenbereichen erfolgreich unter Nutzung der *GST*-Technik durchgeführt:

Schmelzen und Herstellen von Gläsern
- Schmelzen von Siedeperlen
- Schmelzen von *Duran*® – Glasscherben
- Herstellen von Borosilikat-Gläsern
- Herstellen von Edelsteinimitationen

Darstellen, Sintern und Legieren von Metallen
- Darstellen von Eisen
- Sintern von Kupfer- und Eisenpulver
- Schmelzen von Silber und Aluminium
- Herstellen von Messing- und Bronzelegierungen

Darstellen von anorganischen Pigmenten
- *Thenards Blau, Rinmans Grün*
- *Ultramarinblau*
- Zink-, Calcium- und Barium-Luminophore

Weitere Versuche
- Brennen von Gips und Kalk
- Darstellen von Magnesiumnitrid
- Pyrolyse von Pyrit

Im Folgenden werden einige ausgewählte Beispiele ausführlich beschrieben.

Herstellen von Gläsern

Das Herstellen von Gläsern im Experimentalunterricht ist apparativ und zeitlich bislang aufwendig. Zwar gibt es Rezepturen, die schon mit dem Bunsenbrenner geschmolzen werden können, diese enthalten jedoch Bleiverbindungen [8].

Mit der *GST*-Technik können auch bleifreie Gläser hergestellt werden. Dem Experimentator bleibt der umständliche Aufbau eines Gebläsebrenners erspart, die Durchführung verkürzt sich auf etwa zehn Minuten. Weiterhin kann der Läuterungsprozess der Glasschmelze direkt beobachtet werden.

Versuch 6: *Herstellung eines bleifreien Borosilikat-Glases*

Geräte und Chemikalien: GST-Element, Gasbetonstein, Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), Tiegelzange, Spatel, Mörser mit Pistill, Borsäure, Quarzsand, Calciumcarbonat, Natriumcarbonat, Lithiumcarbonat

Abb. 6: Glasschmelze im *GST*-Element nach 2 min im Mikrowellenofen bei 800 Watt

Durchführung: Im Mörser werden 10,6 g Borsäure, 1 g Quarzsand, 1,7 g Calciumcarbonat, 1,8 g Natriumcarbonat und 2,5 g Lithiumcarbonat sorgfältig gemischt [nach 9]. Verstaubungen sind dabei zu vermeiden. Der Tiegel wird zur Hälfte mit dem Gemenge gefüllt, das *GST*-Element auf dem Gasbetonstein im Mikrowellenofen positioniert und die Ofentür geschlossen. Die Mikrowelle wird bei voller Leistung eingeschaltet, bis die Mischung im Tiegel glüht und raucht, was aber zu keiner Belastung der Luft außerhalb des Gerätes führt. Anschließend wird das *GST*-Element mit der Tiegelzange rasch aus dem Mikrowellenofen genommen und auf eine feuerfeste Unterlage abgestellt. Der Tiegel wird mit der Tiegelzange aus der Form genommen und die Schmelze auf eine feuerfeste Unterlage (bewährt hat sich der gekachelte Labortisch) gegossen, so dass möglichst kleine Glasperlen erhalten werden.

Beobachtungen und Auswertung: Der Tiegel des *GST*-Elements glüht nach etwa 2 min Mikrowellenerhitzung gleichmäßig auf (Abb. 6). Die Glasmischung bläht sich zunächst über den Rand des Tiegels auf, fällt aber bald wieder zusammen und wird zu einer dünnflüssigen Schmelze. Diese entwickelt nach etwa 4 min eine mäßige Rauchfahne und wird dann homogen und weitgehend blasenfrei.

Die erkalteten Glasperlen lassen sich ohne Schwierigkeiten vom gekachelten Labortisch abnehmen, größere Perlen zerspringen jedoch aufgrund von Spannungen infolge der schnellen Abkühlung sehr leicht. Gefärbte Gläser lassen sich nach dieser Vorschrift durch Zusatz von Spuren Cobalt(II)-oxid (tiefblau), Kupfer(II)-sulfat (blau), Chrom(III)-oxid (grün) oder Eisen(III)-oxid (gelb) herstellen.

Herstellen von Legierungen, Schmelzen von Metallen

Die Eigenschaften von Metallen sind im Rahmen des Chemieunterrichts von großer Bedeutung. Die mit diesem Thema verbundenen metallurgischen Prozesse erfordern oftmals hohe Temperaturen. Dies gilt etwa auch für die Herstellung von Legierungen wie Messing und Bronze. Interessant ist deren Gewinnung auch unter historischen Gesichtspunkten.

Versuch 7: *Darstellung von Glocken-Bronze*

Geräte und Chemikalien: GST-Element, Gasbetonstein, Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), Tiegelzange, Spatel, Hammer, Amboss, Kupfer (fein gepulvert), Zinn (fein gepulvert)

Durchführung: 8 g Kupferpulver werden mit 2 g Zinnpulver im Tiegel gut gemischt. Das *GST*-Element wird in der Mikrowelle 5 min bei 600 Watt bestrahlt. Ist der Tiegel abgekühlt, wird der Metallregulus entnommen und auf dem Amboss mit dem Hammer ausgeschlagen.

Beobachtungen und Auswertung: Der Tiegel glüht nach etwa einer Minute Mikrowellenerhitzung gleichmäßig. Als Produkt bleibt ein Regulus mit anhaftender Schlacke. Nach dem Aushämmern erhält man ein bronzefarbenes Metallstück.

Versuch 8: *Darstellung von Gelb-Messing*

Geräte und Chemikalien: GST-Element, Gasbetonstein, Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), Tiegelzange, Spatel, Hammer, Amboss, Kupfer (fein gepulvert), Zink (fein gepulvert)

Durchführung: Im Porzellantiegel des *GST*-Elements werden 8 g Kupferpulver mit 2 g Zinkpulver sorgfältig gemischt. Der Tiegel wird mit einem Porzellandeckel abgedeckt, das *GST*-Element in der Mikrowelle positioniert und 5 min bei 600 Watt erhitzt.

Beobachtungen und Auswertung: Nach dem Erkalten findet man einen farblich inhomogenen Regulus mit anhaftender Oxidschlacke am Tiegelboden. Dieser ist gut schmiedbar und lässt sich zu einem teils gelb bis kupferroten Metallstück aushämmern.

Hinweis: Beim Glühen des Gemenges entwickelt sich viel Zinkoxid-Rauch, deshalb muss der Tiegel abgedeckt werden.

Nicht nur die Darstellung vieler Legierungen gelingt mit der *GST*-Technik in kurzer Zeit, auch das Schmelzen von Metallpulvern ist leicht möglich. So erhält man beim Aufarbeiten von Fixierbädern Silber als schwarzes Pulver, das bei ca. 1.000 °C zu einem Regulus geschmolzen werden kann [10].

Versuch 9: *Schmelzen von Silberpulver*

Geräte und Chemikalien: GST-Element, Gasbetonstein, Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), Tiegelzange, Silberpulver (aus Fixierbad, z. B. nach [10]), Borax (wasserfrei)

Durchführung: Das schwarze Silberpulver wird mit 1 - 2 Spateln wasserfreiem Borax vermischt und im Tiegel des *GST*-Elements 5 min bei 800 Watt Mikrowellenleistung erhitzt. Dabei dient Borax als Flussmittel.

Beobachtungen und Auswertung: Beim Glühen der Schmelze entwickelt sich etwas Rauch. Das Silber schmilzt im Tiegel zu einer weißglänzenden Granalie zusammen.

Reduktion von Eisenoxid mit Kohlenstoff in der Mikrowelle

Während der Aluminothermische Prozess zur Herstellung von Eisen spektakulär durchzuführen ist, kann der *Hochofenprozess* als Modellversuch nur mit einem gewissen zeitlichen Aufwand durchgeführt werden. Hier bietet die Reduktion von Eisenoxid mit Kohlenstoff in der Mikrowelle eine Alternative.

Versuch 10: *Reduktion von Eisen(III)-oxid mit gekörnter Aktivkohle*

Geräte und Chemikalien: GST-Element, Gasbetonstein, Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), Tiegelzange, Eisen(III)-oxid, Aktivkohle (gekörnt), Magnet

Durchführung: In den Tiegel des *GST*-Elements werden 1 g Aktivkohle, darauf 5 g Eisen(III)-oxid und deckend noch einmal 1 g Aktivkohle geschichtet. Das *GST*-Element wird 5 min bei 600 Watt im Mikrowellenofen erhitzt.

Beobachtungen und Auswertung: Der Tiegel glüht nach ca. einer Minute Mikrowellenerhitzung gleichmäßig. Nach dem Erkalten finden sich im Tiegel neben den Aktivkohlekörnern einige größere und kleinere Reguli, die mit einem Magneten abgetrennt werden können.

Calciumoxid aus Gips

Durch Erhitzen von Calciumsulfat auf über 800 °C kann Schwefeltrioxid und Calciumoxid gewonnen werden.

$$CaSO_4 \overset{800\ °C}{\rightleftharpoons} CaO + SO_3$$

Dieses ist der erste Reaktionsschritt der Gewinnung von Schwefelsäure nach dem Müller-Kühne-Verfahren, das heute wieder eine gewisse Bedeutung erreicht hat. So wurde in Österreich eine Anlage errichtet, die auf diesem Weg aus Abfallgips, Portlandzement und Schwefelsäure produziert [11].

Versuch 11: *Glühen von Calciumsulfat*

Geräte und Chemikalien: GST-Element, Gasbetonstein, Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), Tiegelzange, 2 Reagenzgläser, Spatel, Calciumsulfat (wasserfrei), destilliertes Wasser, pH-Papier

Durchführung: Der Tiegel des *GST*-Elements wird zur Hälfte mit Calciumsulfat gefüllt und 10 min bei 600 Watt im Mikrowellenofen geglüht. Nach dem Abkühlen wird das Produkt mit ca. 5 mL destilliertem Wasser im Reagenzglas aufgeschlämmt und der pH-Wert geprüft. Zum Vergleich wird der pH-Wert einer Calciumsulfat-Aufschlämmung bestimmt.

Beobachtungen und Auswertung: Der Tiegel des *GST*-Elements glüht nach ca. 1 min gleichmäßig. Nach dem Abkühlen erhält man ein pulvriges Produkt, das mit Wasser unter Wärmeentwicklung reagiert und eine stark alkalische Aufschlämmung ergibt. Filtration führt zu einer klaren Lösung, die sich beim Einleiten von CO_2 trübt. Die Calciumsulfat-Aufschlämmung reagiert dagegen neutral. Calciumsulfat wurde thermolytisch gespalten, das Reaktionsprodukt ist Calciumoxid, welches sich mit Wasser exotherm zum stark alkalischen Calciumhydroxid umsetzt.

Man nimmt allerdings in Kauf, dass das aggressive Schwefeltrioxid korrodierend wirkt und mit der Lüftung nach außen gelangt.

Der „Bologneser Leuchtstein"

Von historischem Interesse ist die Darstellung des ersten je beschriebenen anorganischen Luminophors, des sogenannten *„Bologneser Leuchtsteins"*. Die Herstellung gelang 1602 dem Schuster Vincentinus Casciarolus in Bologna durch mehrmali-

ges Glühen einer Mischung von Schwerspat und Weizenmehl [12].

Versuch 12: *„Bologneser Leuchtstein"*

Geräte und Chemikalien: GST-Element, Gasbetonstein, Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), Tiegelzange, Mörser mit Pistill, Spatel, UV-Lampe, Bariumsulfat, Weizenmehl

Durchführung: Im Tiegel des *GST*-Elements werden 3 g Bariumsulfat mit 5 g Weizenmehl sorgfältig gemischt. Das Gemenge wird 10 min bei 400 Watt im Mikrowellenofen geglüht. Nach dem Abkühlen wird der Tiegelinhalt im Dunkeln unter einer eingeschalteten UV-Lampe ausgebreitet und diese nach einigen Sekunden ausgeschaltet.

Beobachtungen und Auswertung: Nach Einschalten der Mikrowelle erfolgt zunächst eine starke Rauchentwicklung im Tiegel, welche durch das verkohlende Weizenmehl verursacht wird. Auch hier ist keine Belastung der Umwelt zu befürchten. Nach einer Minute glüht der Tiegel gleichmäßig. Die Glühintensität folgt dabei dem Pulsintervall des Magnetrons. Bariumsulfat wird durch das zu feinpulvrigem Kohlenstoff verbrannte Mehl zu Bariumsulfid reduziert.

$$BaSO_4 + 4\,C \xrightarrow{1100\,^\circ C} BaS + 4\,CO$$

Als Produkt erhält man nach dem Abkühlen einen graubraunen, porösen Feststoff, der unter dem UV-Licht intensiv orange lumineszient und im Dunkeln einige Sekunden nachleuchtet. Reines Bariumsulfid zeigt keine luminophore Eigenschaft. Spurenanteile von Schwermetallsalzen im Weizenmehl (10^{-2} %) verursachen als Aktivatoren das Nachleuchten des *„Bologneser Leuchtsteins"*.

Hinweis: Das Glühprodukt kann gemörsert und wiederholt geglüht werden, wodurch sich die Leuchtkraft des Luminophors erhöht.

Thenards Blau

Kommerziell überaus erfolgreich war der französische Chemiker Louis-Jacques Thenard mit der Darstellung des Spinells $CoAl_2O_4$ durch Glühen von Cobaltcarbonat mit Aluminium(III)-oxid und Kaliumchlorid als Flussmittel. Als tiefblaues Farbpigment ist *Thenards Blau* aufgrund guter chemischer Beständigkeit eine begehrte Tonwarenfarbe.

Versuch 13: *Darstellung von Thenards Blau (nach [13])*

Geräte und Chemikalien: GST-Element, Gasbetonstein, Haushalts-Mikrowellenofen (800 Watt), Tiegelzange, Mörser mit Pistill, Becherglas (100 mL), Heizplatte, Filtertrichter mit Papierfilter, Cobaltcarbonat, Aluminium(III)-oxid, Kaliumchlorid, Salzsäure, w(HCl) = 25 %, dest. Wasser

Durchführung: 1,7 g Cobaltcarbonat, 2 g Aluminium(III)-oxid und 5,5 g Kaliumchlorid werden im Mörser sorgfältig gemischt. Das Gemenge wird im Tiegel des *GST*-Elements 5 min bei 400 Watt in der Mikrowelle geglüht. Nach dem Abkühlen wird das Produkt aus dem Tiegel entfernt und im Mörser pulverisiert. Das Pulver wird im Becherglas mit ca. 20 mL Salzsäure 5 min gekocht. Nach dem Abkühlen verdünnt man vorsichtig mit ca. 50 mL Wasser und filtriert den Feststoff ab. Der Filterrückstand wird getrocknet.

Beobachtungen und Auswertung: Das Reaktionsgemenge ist dunkelgrau. Nach dem Glühen und Mörsern liegt ein tiefblaues, feines Pulver vor, das nach Aufarbeitung mit Salzsäure und Trocknen noch farbintensiver erscheint. Durch das Glühen verbinden sich die Metalloxide zu einem Mischoxid mit Spinellstruktur. Die Reaktion läßt sich wie folgt beschreiben:

$$CoCO_3 + Al_2O_3 \xrightarrow{[KCl],\,1100\,^\circ C} CoAl_2O_4 + CO_2$$

7. Ausblick

Neben der Erzeugung hoher Temperaturen gelingt es durch Mikrowellenbestrahlung zum einen, eine große Zahl organischchemischer Umsetzungen, zum Teil in lösungsmittelfreien Systemen, dramatisch zu beschleunigen, zum anderen Plasmavorgänge zu realisieren. Zu diesen Anwendungsgebieten der Mikrowellenstrahlung folgen in Kürze weitere Publikationen.

Bezugsadressen

- Feuerfest Mörtel K II (bis 1.400 °C), 5 kg Eimer, FFS Feuerfest Siegburg, Peter Lichtenberg GmbH & Co. KG, 53894 Mechernich – Satzvey
  erhältlich in Baumärkten
- Graphit-Spray – *Graphit 33*, 200 ml, Art. Nr. 20.760.6.09.12.01, CRC Industries Deutschland GmbH, 76473 Iffezheim
  erhältlich bei Conrad electronic
- Mikrowellen-Leck-Tester, Best.-Nr. 10 21 56-11
  Conrad electronic, 92240 Hirschau, www.conrad.de

Literatur

[1] Römpp Lexikon Chemie, Mikrowelle, Version 1.3, Stuttgart/New York 1997
[2] Brockhaus ABC Physik, Magnetron, Band 1/A-Ma, Leipzig 1989², 586
[3] http://www.ed.ac.uk/~ah05/microwave.html
[4] M. P. Mingos, D. R. Baghurst, Applications of Microwave Dielectric Heating Effects to Synthetic Problems in Chemistry, Chem. Soc. Rev. **20** (1991) 1 - 47
[5] N. Leitgeb, Strahlen, Wellen, Felder: Ursachen und Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit, Stuttgart 1990
[6] http://www.physics.ohio-state.edu/~maarten/microwave/microwave.html#disc
[7] B. P. Turner, M. G. Ury, W. G. Love, Sulfur Lamps – Progress in Their Development, paper presented at the IES annual meeting, August 1995
[8] A. Schleip, E. Wiederholt, Chemie, Frankfurt/Main 1980, 115
[9] A. Peters, O. Lindig, Chem. Exp. Technol., **3** (1977) 354
[10] H. J. Kogelnik, Recycling von Silber aus photographischen Bädern, PdN-Ch **31** (1982) 353
[11] H. J. Bader, D. Sgoff, Nur ein wenig Wasser – Unterrichtsvorschläge zum Thema Gips, NiU (Chemie) **7**/32 (1996) 35
[12] Holleman-Wiberg, Lehrbuch der anorganischen Chemie, Berlin 1995¹⁰¹, 1134
[13] G. Jander, E. Blasius, Lehrbuch der analytischen und präparativen anorganischen Chemie, Stuttgart 1989¹³, 472

Eingegangen am 05. September 2000