Rotes Kupferoxid – Beobachtungen zur Synthese

Beatrix Waldburger

Zusammenfassung

Die Entwicklung einer chemischen Synthese ist ein komplexes Geschehen. Aufbauend auf einigen chemischen Grundlagen zu Substanzen und Reaktionen, ergänzt von physiologisch-therapeutischen Gesichtspunkten, werden die Bemühungen um die Entwicklung zur Herstellung von Rotem Kupferoxid in pharmazeutischer Qualität beobachtet. Im Lauf der Entwicklungsarbeit werden die Korrespondenzen der Paare Theorie und Praxis, Substanz und Synthese, Wahrnehmung und gewonnene Erfahrung, ablaufen/handeln und wirken, Werk und Wirksamkeit immer interessanter. Die Synthese-Entwicklung lässt sich mit Wachstumsbewegungen analog zum Pflanzenwachstum beschreiben. Es wird zur Diskussion gestellt, ob den Werk-Abläufen ätherische Bildekräfte zugrunde gelegt werden können, die mit und durch den Menschen wirksam werden. Die sich am Tun bildende Erfahrung wird im Zusammenhang mit Fähigkeit resp. Potential gesehen – Begriffe, die auch auf Substanzen und im Lebendigen angewendet werden können.

Summary

The development of a chemical synthesis is a complex process. Regarding some basic chemical data of substances and reactions, in addition with physiological and therapeutical aspects, the efforts to develop a preparation of red copper oxide in pharmaceutical quality were observed. In the course of developing the synthesis the correspondances of the pairs theory and practice, substance and synthesis, perception and experience, taking place/acting and being effective, creation and effectiveness became more and more important. The development of the synthesis can be described as growth movements analogous to the way plants grow. It is put up for discussion, if etherical forces, which are effective with and through humans, can be underlayed to the flow of development. The experience which forms itself in practice is seen in connection with skill/ability resp. potential – concepts which can also be applied to substances and the living nature.

Einleitung

Das anthroposophische Pharmaunternehmen WALA verwendet Kupfer(I)-oxid, auch Rotes Kupferoxid genannt, als Ausgangsstoff für Arzneimittel. Der Jahresbedarf liegt im Bereich einiger Kilogramm, was für industrielle Hersteller zu wenig Anreiz bietet, einen Herstellungsprozess für Rotes Kupferoxid in pharmazeutischer Qualität zu entwickeln. So wurde entschieden, WALA-intern eine Synthese auszuarbeiten und für die Herstellung zu optimieren.

Überlegungen zur Substanz

Die Frage nach der Substanz hat die Chemie unter anderem mit dem Periodensystem der Elemente (Abb. 1) und den Reaktionsgleichungen der mit ihnen verbundenen Prozesse beantwortet. Mit physikalischen Messgrössen und theoretischen Berechnungen beschreibt sie Atome und Moleküle mit einer gegebenen Präzision innerhalb der Messgrenzen und den Einschränkungen der Theorie. Messdaten und theoretische Überlegungen werden als Basis für Synthesekonzepte verwendet. Bei Reaktionsgleichungen hingegen nimmt die Präzision ab. Unschärfen werden offensichtlicher, d.h. Prozesse können nicht mit der gleichen Exaktheit und Eindeutigkeit wie Atome und Moleküle beschrieben werden. Die chemischen Gleichungen können zwar in abstrahierter Form formuliert werden, aber die Reaktionen finden immer in der Realität unter dem Einfluss der jeweils herrschenden Bedingungen statt und sind offen für unerwartete Modifizierungen. Die Einzelgeschehnisse während den Reaktionen sind nur bedingt messbar. Bei jeder Messung muss damit gerechnet werden, dass mit ihr in den Prozess eingegriffen und damit die Reaktion gestört wird. Reaktionsgleichungen tragen tendenziell den Charakter von Hinweisen und Richtungen, damit sich die Experimentierenden bei realen Vorgängen zurechtfinden. Das beobachtende, empirische Vorgehen der Pioniere wie etwa Friedlieb Ferdinand Runge (1794–1867), Justus Liebig (1803–1873) oder Wilhelm Ostwald (1853–1932) hat aber bis heute seine Berechtigung behalten. Jeder Prozess besitzt seine Eigenheiten und verlangt vom Chemiker ein gewisses Mass an wacher Begleitung, Identifizierung und Eigenleistung.

Nehme ich einen Standpunkt ein, der das Geistige in der Natur berücksichtigt, sind den Substanzen über das Materielle hinausgehende Seins-Ebenen zuzumessen resp. es entstehen aus unsichtbaren geistigen Ebenen die materiellen Eigenschaften. Im am Materiellen anschliessenden Gebiet sind die den Substanzen innewohnenden Potentiale und Kräfte zu nennen. Diese sind per definitionem unsichtbar. Sichtbar werden nur die Substanzänderungen, die durch deren Wirken eintreten. Die wahrnehmba-

ren Substanzqualitäten, sei es Farbe, Geruch, Struktur, Fliesseigenschaften u.a.m., können als Hinweise auf die Potentiale gelesen und interpretiert werden. Das Periodensystem kann demzufolge auch geisteswissenschaftlich betrachtet werden:

> *«Nicht die Elemente fügen sich zum Periodensystem zusammen, sondern das Periodensystem ist ein Abbild geistiger Harmonie-Gesetzmässigkeiten. Die Stoffe bestehen dann aus Elementen, die aus diesen Gesetzmässigkeiten heraus ins irdische Dasein geboren worden sind.»*
> (*Waldburger* 2018, S. 39)

Man könnte hier anfügen: «[…] und unablässig geboren werden.» Dieses «vorstoffliche» Gebiet lässt sich als ein Gebiet von Wirksamkeiten ohne physische Präsenz der Substanzen denken – ein Gebiet, in dem die Potentiale und Kräfte in ständiger Verwandlung begriffen sind. Sie versenken sich in die physisch gewordenen Substanzqualitäten und rufen dort Verwandlungen hervor. In diesem Sinne beschreibt der Begriff «chemische Reaktion» Vorgänge im Gebiet der Substanz-Wirksamkeit, die am Verschwinden der Ausgangsstoffe, am Erscheinen der Produkte und an den Änderungen der Umgebungsbedingungen wahrnehmbar werden. Die Qualität des Wirksamkeitsgebietes kann als ätherisch beschrieben werden. Diese ätherische Qualität äussert sich im Unbelebten an der Diskontinuität der physischen Substanzen. In der belebten Welt wird das Ätherische an der Lebendigkeit der Pflanzen, Tiere und des Menschen wahrnehmbar. Im Stoffwechsel der Lebewesen kommen chemische Labilität und Unschärfe in Bezug auf Messbarkeit deutlich zum Ausdruck. «Je organischer ein Stoffzusammenhang wird, desto weniger bindet sich chemisch das eine an das andere, desto chaotischer werden die Stoffe durcheinandergewirbelt» – so charakterisiert Rudolf Steiner den Schritt vom Mineralischen ins Organische (*Steiner* 1921, S. 89). Mit der Entwicklung einer chemischen Synthese bietet sich eine Gelegenheit, die Wirksamkeit von Substanzen ins Erleben aufzunehmen. In Bezug auf die Reaktionsgleichungen sind die Substanzumsetzungen erwartet, in Bezug auf das tatsächliche Reaktionsgeschehen treten jedoch unerwartete Ereignisse auf. Überlegungen aus dem Pendeln zwischen Theorie und Praxis sollen im Folgenden dargestellt werden.

Kupfer im Vergleich zu Eisen, Silber und Gold im Periodensystem

Das Periodensystem ist so geordnet, dass es Zeile (Periode) für Zeile von links nach rechts gelesen werden kann. Jedes nachfolgende Element besitzt jeweils ein Elektron mehr. Um die Schreibweise für die Anzahl Elektronen abzukürzen, setzt man das Edelgas der oberen Zeile in Klammern und

führt dann in der nächsten Reihe darunter die Elektronen auf, die in der neuen Periode für das Element hinzukommen. Im Periodensystem steht Kupfer mit den klassischen Edelmetallen Silber und Gold in der gleichen Gruppe (Spalte). Einer Gruppe gehören Elemente an, die sich chemisch auf ähnliche Weise benehmen, aber eins nach dem anderen schwerer sind. Im Fall von Eisen und Kupfer bildet Argon (Ar) den Edelgas-Abschluss, bei Silber ist es Krypton (Kr) und bei Gold Xenon (Xe). Das in der Gruppe tiefer stehende Element besteht aus mehr subatomaren Teilchen und hat eine grössere strukturelle Komplexheit. Gruppenelemente weisen aber in Bezug auf die Eigenschaften, Potentiale und Wirksamkeiten eine stärkere und vielfältigere Verwandtschaft unter sich auf als mit ihren Periodennachbarn links und rechts (Tab. 1). Die Angaben zu den Elektronenkonfigurationen bilden diesen Zusammenhang ab. Im älteren, mit der Ordnungszahl

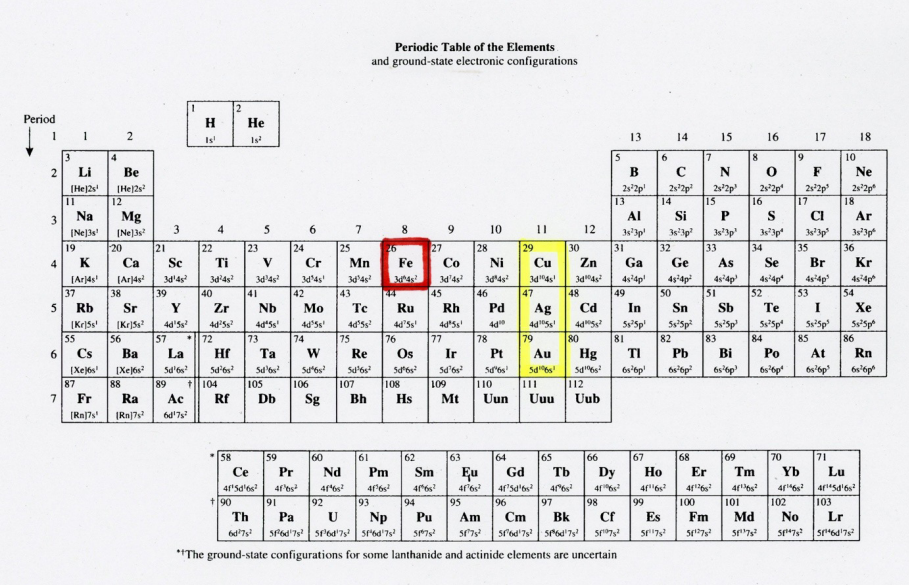


Abb. 1: Periodensystem aus dem Lehrbuch «Chemistry of the Elements» (*Greenwood* 1997).

	Fe	Cu	Ag	Au
Elektronenkonfiguration	(Ar) $3d^6\ 4s^2$	(Ar) $3d^{10}\ 4s^1$	(Kr) $4d^{10}\ 5s^1$	(Xe) $4f^{14}\ 5d^{10}\ 6s^1$
Spez. Dichte (g/cm^3)	7,87	8,96	10,50	19,28
therm. Leitfähigkeit (W/m/K)	80	401	429	317
el. Leitfähigkeit (10^6 S/m)	10,29	59,77	62,89	42,55
Schmelzpunkt (°C)	1535	1085	961	1065
Kristallstruktur	kubisch	kubisch	kubisch	kubisch

Tab. 1: Datenvergleich von Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Silber (Ag) und Gold (Au).

und der Elektronenkonfiguration beschrifteten Periodensystem von 1997 (Abb. 1) sind Eisen als linker Nachbar und die Gruppenelemente Kupfer, Silber und Gold markiert.

In Tab. 1 sind die Kupferdaten zwischen diejenigen des unedleren, reaktionsfreudigeren Eisens in der gleichen Periode und der Edelmetalle Silber und Gold der gleichen Gruppe gestellt.

Die Elektronenkonfiguration gibt die Verteilung der Elektronen in die verschiedenen, theoretisch strukturierten Aufenthaltsräume um den Atomkern, die sog. Orbitale, an. Für die Orbitale gelten Gesetzmässigkeiten, die die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen in Bezug auf Raumstrukturen und Energieniveaus beschreiben. Auf diese lassen sich die Reaktionspotentiale der Elemente zurückführen. Die gemeinsame d^{10} s^1 Konfiguration der Kupfergruppe zeigt eine engere Verwandtschaft des Kupfers mit den Edelmetallen Silber und Gold als mit dem Eisen, dem es zwar gemäss der Ordnungszahl nähersteht, das aber mit einer d^6 s^2-Konfiguration anders mit Elektronen bestückt ist. An sich gilt eine mit zwei Elektronen gefüllte s-Schale (s^2) als energetisch günstigerer Zustand. Bei der Kupfer-Gruppe wird diese Regel durchbrochen. Kupfer, Silber und Gold sind gemeinsam duktiler, weicher, leiten Wärme und Elektrizität besser und schmelzen bei niedrigeren Temperaturen als Eisen. Traditionell wird Kupfer als Halbedelmetall bezeichnet, da es bei höheren Temperaturen, bei denen die Edelmetalle Silber und Gold noch inert sind, an der Oberfläche oxidiert.

Kupfer, Kupfer(I)-oxid und Kupfer(II)-oxid

	Kupfer	**Kupfer(I)-oxid**	**Kupfer(II)-oxid**
Chemische Bezeichnung	Cu	Cu_2O	CuO
Farbe	hell lachsrot	rot	schwarz
Elektronenkonfiguration des Kupfers	Cu^0: (Ar) $3d^{10}$ $4s^1$	Cu^{1+}: (Ar) $3d^{10}$ $4s^0$	Cu^{2+}: (Ar) $3d^9$ $4s^0$
Kristallstruktur	kubisch	kubisch	monoklin

Tab. 2: Datenvergleich von metallischem Kupfer, rotem Kupfer(I)-oxid und schwarzem Kupfer(II)-oxid.

Die Elektronenkonfigurationen in Tab. 2 zeigen, dass auch bei den Oxiden ein möglichst gefülltes d-Orbital gegenüber der Besetzung des in der Regel energetisch stabileren s-Orbitals bevorzugt wird. Dem d-Orbital wird eine

vielfältigere Geometrie zugeordnet als dem kugelförmigen s-Orbital. Daraus kann die Flexibilität abgeleitet werden, verschiedene Liganden in unterschiedlich räumlicher Anordnung zu koordinieren und Komplexe zu bilden. Das rote Kupferoxid, stöchiometrisch Cu_2O, besitzt, wie das metallische Kupfer (Cu), eine kubische Kristallstruktur (Abb. 2). Einmal kristallisiert, tendiert Cu_2O dazu, immer mehr Sauerstoff ins Kristallgitter aufzunehmen. Dieser Vorgang kann so weit gehen, dass der Platz im kubischen Gitter zu eng wird. Dann klappt die Kristallstruktur vom kubischen Cu_2O auf das monokline CuO-Gitter um. Metallisches Kupfer und CuO sind die stabilen Phasen. Das Cu_2O in der Mitte vermag in Cu und CuO zu disproportionieren resp. kann unter hohem Energieaufwand daraus synthetisiert werden.

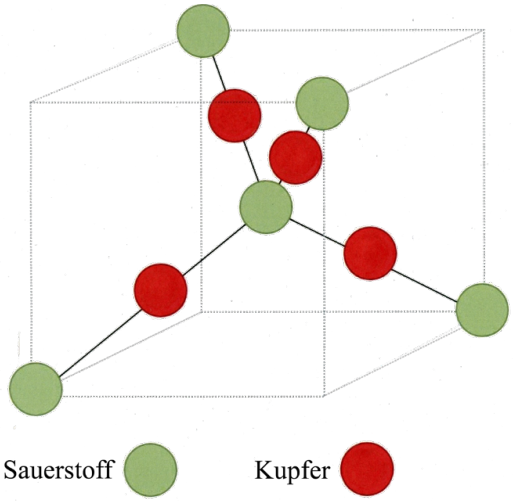


Abb. 2: Kupfer(I)-oxid im kubischen Kristallgitter-Modell.

Kupfer und Eisen in Kultur und Physiologie

Um die gewünschten pharmazeutischen Qualitäten des Roten Kupferoxids zu verdeutlichen, wird dieses im Vergleich zum Eisen betrachtet. Kupfer wird in der Evolution der Kulturen und der Lebewesen vom Eisen abgelöst. Kupfer rückt vom vordersten Platz weg, bewahrt das Frühere und übernimmt vielfältige Spezialgebiete. Kupfer übernimmt die Rolle als kleinere und sanftere Schwester des Eisens. Bereits im metallischen Zustand drückt sich diese Charakteristik aus. Metallisches Eisen verbindet sich mit Sauerstoff intensiver und rostet durch und durch. Metallisches Kupfer überzieht sich nur mit einer feinen Oxid-Schicht aus Rotem Kupferoxid, die sich weiter zu einer braun-grünen, schützenden Patina aus Kupfercarbonaten-sulfaten-chloriden (in Meer-Nähe)-hydroxiden umwandelt. So bleibt der metallische

Kupferkern geschützt. Dieselbe Eigenschaft zeigen Kupferlegierungen wie z.B. Bronze, eine Kupfer-Zinn-Legierung. So sind griechische Bronzeplastiken bis heute erhalten. Kupfer-Bronze-Zeiten entwickelten sich zuerst, gefolgt von der Eisenzeit. Aufgrund der besseren Eignung für zivilisatorische Werkzeug-, Waffen- und Maschinenentwicklungen verdrängte Eisen Kupfer und Bronze vom vordersten Platz. Bei der Evolution des Lebendigen tritt eine ebensolche Reihenfolge auf. Die Sauerstoffatmung der Lebewesen begann mit dem kupferhaltigen, blauen Hämocyanin, wurde dann aber während der Höherentwicklung der Lebewesen vom eisenhaltigen, roten Hämoglobin abgelöst. Einzig bei niedrigeren Tieren wie Gliederfüsslern, Mollusken und Tintenfischen blieb die Hämocyanin-Atmung erhalten. Eine Spur der Kupfer-Eisen-Abfolge findet man noch am Lebensanfang in der Phase des Wachstums. So weisen schwangere Frauen und Kleinkinder einen etwas höheren Kupferspiegel im Blut auf als nicht schwangere Erwachsene. Kupfer- und Eisenproteine übernehmen korrespondierende Funktionen beim Sauerstofftransport, der Oxygenierung, der Oxidase-Aktivität, der Elektronenübertragung, der NO_2-Reduktion und bei Antioxidationsvorgängen. Im Prinzip machen Kupfer-Proteine die Eisen-Atmung erst möglich. Das Frühere bleibt präsent. Es übernimmt essentielle Funktionen für das Spätere.

Überlegungen zum Kupfer als Arzneimittelwirkstoff knüpfen an die zeitlichen und funktionellen Verwandtschaften von Kupfer und Eisen an. Kupfer soll die Regeneration von Stoffwechsel- und Atmungsfunktionen mit seinem jugendlich-aufbauenden therapeutischen Potential anregen und unterstützen. Mit der Verwendung von Rotem Kupferoxid anstelle von metallischem Kupfer legt WALA den Fokus noch intensiver auf Aspekte von labilen resp. flexiblen, stoffwechselintensiven Aufbauphasen. Experimentell bedeutet es, ein sanfteres und weicheres Kupfer-Sein mit dazugehörender Substanz- und Prozess-Labilität zu akzeptieren und die Synthese entgegen den Verlockungen nach einer Eisen-artigen Stabilität weiterzuentwickeln.

Auswahl an Herstellverfahren von Kupfer(I)-oxid

Bei der Entwicklung einer WALA-Herstellung von Rotem Kupferoxid wurden verschiedenste Synthesewege recherchiert. Vor dem Hintergrund der therapeutischen Indikation des Roten Kupferoxids wurden die Herstellungsprozesse im Team besprochen, um ein stimmiges Bild für die WALA-Synthese zu entwerfen. Zum Schluss wurde die Entwicklung eines Syntheseweges ausgewählt ohne den Anspruch, dass nicht auch andere Wege gangbar gewesen wären. Die Begründungen für die Wahl sind meine eigenen, es wurden auch andere Sichtweisen diskutiert. Der Diskurs wird nicht wiedergegeben, da es darauf ankommt, was zur Tatsache wird, sich auf einen Weg einzulassen. Zudem kommt die Auswahl nur einer Grund-

steinlegung gleich. Welchen Weg die Entwicklung nimmt, ist offen. Das Ziel ist bekannt: Rotes Kupferoxid in pharmazeutischer Qualität.

Zur Auswahl standen die im Folgenden kurz beschriebenen industriellen Synthesewege. Bei der Komproportionierung[1] von metallischem Kupfer und schwarzem Kupfer(II)-oxid durch Erhitzen bis zur Rotglut des Metalls auf 800°C liegen die Herstellungsbedingungen noch zu tief in der Metallurgie und zu weit weg von physiologischen Verhältnissen. Bei der Reaktion von Kupfer(I)-chlorid mit Laugen, z.B. mit Natronlauge, bei einigen 100° C werden die Prozessbedingungen als immer noch zu aggressiv erachtet. Die Reduktion von Kupfer(II)-salzen in alkalischer Lösung läuft zwar bei Temperaturen unter dem Siedepunkt von Wasser ab, jedoch erweisen sich die üblichen Reduktionsmittel wie Hydrazin, Formaldehyd oder Propionaldehyd als problematisch, da sie giftig, krebserregend oder explosiv sind. Eine Reihe weiterer Verfahren findet man in neueren Forschungsfeldern, die an den optischen und den katalytischen Eigenschaften von Kupfer(I)-oxid interessiert sind. Für die Lasertechnik werden mit unterschiedlichen Herstellverfahren gezielt Nano-Kristalle bestimmter Morphologie gezüchtet (*Kuo* 2010). Dabei wird eine wässrige Synthese durch Reduktion von Kupfer(II)-sulfat mit Natriumascorbat, einem Vitamin C-Derivat erwähnt. Dieses Reduktionsmittel wird bereits als «sanfter», d.h. physiologisch adäquater betrachtet. In der Klimaforschung wird Kupfer(II)-acetat mit Glucose zu Kupfer(I)-oxid reduziert und dann CO_2-haltige Luft durch die Suspension geblasen, um Methanol herzustellen. Die Forscher nennen ihr Projekt in Anlehnung an die Photosynthese «artificial leaf» (*Wu* 2019). Die Reduktion von Kupfer(II)-sulfat mit Glucose, die Fehling-Reaktion, wird zum Nachweis von reduzierenden Zuckern verwendet und ist nicht auf Ausbeute, Reinheit und exakten Farbton des Kupfer(I)-oxids angelegt. Die Empfindlichkeit der Kupfer(I)-oxid-Entstehung wird in dieser qualitativen Analysemethode in der Weise genutzt, dass möglichst viele reduzierende Zucker auch in geringen Mengen erfasst werden können – d.h. die Methode ist «unscharf» eingestellt. Nach einigen Vorversuchen fiel die Wahl auf die Fehling-Reaktion, mit der mehrfach physiologische Verhältnisse angesprochen werden.

Kupfer, Kupfer(I)-oxid, Kupfersulfat und Glucose in der Physiologie

In der Physiologie des Menschen kommt dem Kupfer als Zentralatom in vielen Enzymen aufgrund seines Potentials, Redoxreaktionen zu katalysieren, grosse Bedeutung zu. Kupfer ist nach Eisen und Zink das dritthäu-

1 Gleichzeitige Reduktion und Oxidation aus einer höheren und einer niedrigeren Oxidationsstufe zweier Atome des gleichen Elements.

figste Spurenelement. Der Wechsel der Oxidationsstufe Cu(I) zu Cu(II) liegt bei einem Redoxpotential von 0,16 V im physiologischen Bereich. Das macht Cu(I) geeignet, Elektronen- und Sauerstofftransfers im Stoffwechsel zu übernehmen. Es liegt als thermodynamisch stabiler Komplex in Proteinstrukturen vor. Die Cu(I)-Cu(II)-Reaktionseinheit bildet das aktive Zentrum des Hämocyanins und der vielseitigen Kupferproteine. Kupferproteine werden nach strukturellen und funktionellen Gesichtspunkten in Typ I der blauen Kupferproteine, Typ II der nicht-blauen Kupferproteine und Typ III der Dimeren-Kupferproteine eingeteilt. Bekannte Vertreter sind Plastocyanin aus der Photosynthese der Pflanzen und Nitritreduktase bei Typ I, verschiedene Oxidasen, z.B. Galactose-Oxidase und Dopamin-Monooxidgenase bei Typ II und Tyrosinase bei Typ III. Hämocynin gehört zu den Typ III-Kupferproteinen, die für Sauerstofftransport und Oxygenierung zuständig sind. Die Cu(I)-Cu(II)-Reaktionseinheit besitzt eine hohe kinetische Labilität, prädestiniert für schnelle Reaktionen.

> *«Dies ist mit einer grossen Variabilität der aktiven Zentren, die einerseits auf den verschiedenen möglichen Koordinationsgeometrien der Kupferzentren, als auch auf der unterschiedlichen Art der koordinierenden Liganden fusst, zu begründen.»*
>
> (*Jurgeleit* 2020)

Auch wenn Kupferproteine beim Menschen nicht direkt am Sauerstofftransport beteiligt sind, «handelt es sich um ein essentielles Spurenelement mit Bedeutung vor allem für die Atmungskette» (*Kaim & Schwederski* 2010, S. 194).

Die Fehling-Reaktion verwendet Kupfersulfat, ein schwefelhaltiges, blaues Salz, als Kupferquelle. Nach therapeutischen Gesichtspunkten steht Kupfer mit dem System des venösen, blauen Blutes in Beziehung. Der Arzt Heinz-Hartmut Vogel, der wesentlich an der Entwicklung von WALA-Arzneimitteln beteiligt war, schreibt:

> *«Das Kupfer entfaltet seine prozessuale Wirksamkeit vor allem im venösen Bereich, indem es […] Licht und Wärme im aufbauenden Stoffwechsel zur Wirksamkeit bringt».*
>
> (*Vogel* 1994, S. 834)

Unter diesem Aspekt fügt sich der Farbwechsel von blauem Kupfersulfat zu Rotem Kupferoxid in das Therapiekonzept der Durchatmung ein. Bei der Fehling-Reaktion wird das Kupfer aus der salzartig gewordenen Schwefel-Verbindung gelöst und zur Verbindung mit Sauerstoff geführt. Dies kommt einer Geste der Einatmung gleich.

Die Glucose, die in der Fehling-Reaktion als Reduktionsmittel eingesetzt wird, hat eine seit Beginn der Photosynthese alles überragende Bedeutung für Lebewesen. Deren Energie- und Kohlenstoffwechsel hängt unmittelbar vom Vorhandensein resp. von der Verwertbarkeit von Glucose ab. Glucose wird permanent ab-, um- und aufgebaut. Von Säugetieren und Mensch kann sie als Glycogen gespeichert und bei Bedarf im Citratzyklus und in der Atmungskette in Kohlendioxid und Wasser aufgelöst werden. Mit der beim Glucoseabbau frei werdenden Energie durchwärmen und bewegen sich Tier und Mensch. Pflanzen bilden Glucose originär durch Photosynthese. Sie bauen damit Cellulose auf. Sie strukturieren Glucose um zu Fructose und anderen Zuckern, die sie zu Zweifach-Zuckern, sogenannten Disacchariden, zusammenfügen. Dazu gehört auch die Saccharose, die wir umgangssprachlich mit «Zucker» bezeichnen. Der Mensch kann Disaccharide weder bilden noch direkt verwerten. Er muss die pflanzlichen Disaccharide bei der Verdauung im Darm wieder in Monosaccharide spalten, um sie für den Stoffwechsel verfügbar zu machen. Mit Blick auf die Monosaccharid-Qualität von Glucose ergibt sich ein weiteres verwandtschaftliches Band von Synthese und menschlicher Physiologie.

Gestützt durch die Betrachtungen der Physiologie wird die Fehling-Reaktion als geeigneter, möglichst sanfter Syntheseweg angesehen. Sowohl auf der physiologischen wie auch auf der Seite der chemischen Synthese zeichnen sich Kupfer(I)-oxid und Glucose durch Instabilität resp. Flexibilität der Substanzen aus, sich in Prozessen umzuwandeln.

Ich habe beschlossen, eine Fehling-Reaktion mit hoher Ausbeute und Kupferoxid von rein-roter Farbe auszuarbeiten. Worin die empfindliche Gleichgewichtslage von Rotem Kupferoxid und dessen Synthese besteht, wird im Folgenden dargestellt.

Reaktionsgleichung, Ausgangsstoffe und Produkte

Vereinfachte Reaktionsgleichung:

$$2Cu^{2+} + R\text{-}CHO + 4\ OH^- \rightarrow Cu_2O + R\text{-}COOH + 2H_2O$$

Kupfersulfat + Glucose + Natronlauge → Rotes Kupferoxid + Gluconsäure + Wasser

Als Kupferquelle wird Kupfer(II)-sulfat Pentahydrat eingesetzt. Das natürliche Kupfersulfat Chalkanthit entsteht bei der Verwitterung von Kupfererzen. Es ist sehr gut wasserlöslich, so dass es nur in trockenen, wüstenartigen Gegenden kristallin vorkommt. Im Labor lassen sich die Kupfersulfat-Kristalle einfach züchten (Abb. 3). Gelöstes Kupfersulfat besitzt keimtötende Eigenschaften und verursacht bei Lebewesen Vergiftungserscheinungen. In

der Homöopathie wird Kupfersulfat als krampflösendes Arzneimittel eingesetzt. Heilwässer, wie das Levico-Wasser, das bei Erschöpfungszuständen und zur Anregung des Aufbaustoffwechsels indiziert ist, enthalten Kupfer und Sulfat in gelöster ionischer Form, Cu^{2+} und SO_4^{2-}.

Damit Kupfersulfat im alkalischen Milieu nicht als gelartiges Kupferhydroxid ausfällt, sondern in Lösung bleibt, wird Kaliumnatriumtartrat, auch Seignette-Salz genannt, eingesetzt. In wässriger Lösung bildet sich ein tiefblauer Tartrat-Kupfer-Komplex. Der Tartrat-Komplex schützt das Kupfer(II) und hält es bereit für die Reduktion zu Kupfer(I) unter Aufnahme von Sauerstoff. Das Tartrat ist theoretisch ein zweizähniger Lingand, so dass idealerweise zwei Tartrationen ein Kupferion in planarer Konfiguration binden. In wässriger Lösung sind jedoch auch Komplexe mit 3–6 Tartrat-Liganden nachgewiesen worden. Bei 3–6 Liganden beteiligen sich die endständigen COO^--Gruppen an der Komplexbildung. Bei 1–2 Liganden übernehmen zur Hauptsache die OH-Gruppen die Komplexbildung (Abb. 4). Dies ist insbesondere im alkalischen Milieu der Fall (*Jespersen* 1972). Die Minimalmenge an Seignette-Salz, um das Kupfer(II)-Ion in Lösung zu halten, wurde für die WALA-Synthese experimentell bestimmt. Die Seignette-Menge wurde so eingependelt, dass das Kupfer gerade nicht mehr als weisslich blaues Kupferhydroxid ausfällt.



Abb. 3: Kupfer(II)-sulfat Pentahydrat, gezüchtete Kristalle.

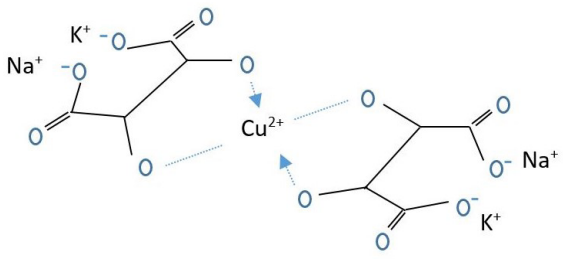


Abb. 4: Skizze eines Kupfer^{2+}-Tartrat-Komplexes mit zwei Liganden und Bindungsstellen an den OH-gruppen.

Glucose mit der Summenformel $C_6H_{12}O_6$ liegt je nach Reaktionsbedingungen als ringförmiges oder offenkettiges Molekül vor. In obiger Reaktionsgleichung wird mit R-CHO die reduktive Aldehydgruppe *–CHO* hervorgehoben, die im Lauf der Redox-Reaktion zu einer Säuregruppe *–COOH* oxidiert wird, d.h. Gluconsäure entsteht. Alles andere wird mit *R-* für Rest bezeichnet. Im alkalischen Milieu gehen allerdings weitere Abbauvorgänge mit Glucose und Tartrat unkontrollierbar weiter. Um dies zu minimieren, wird die Natronlauge bei der Fehlingprobe erst unmittelbar vor der Verwendung zugegeben. Die «Sanftheit» des Reduktionsmittels Glucose zeigt hier eine labile, für unsere Zwecke empfindliche Seite, denn weitere Abbauprodukte können zu unerwünschten Verunreinigungen führen.

Natronlauge (NaOH) wird industriell durch Elektrolyse von Kochsalz in grossen Mengen hergestellt und verwendet. In wässriger Lösung dissoziiert sie vollständig in Na^+ und OH^-, ist stark alkalisch und demzufolge stark ätzend. Bei der Fehling-Reaktion stellt sie das alkalische Milieu sicher. Dafür könnte auch Kalilauge (KOH) verwendet werden. Diese hat jedoch den Nachteil, dass Kalium-Tartrate gebildet werden, sog. Weinstein, der beim Abkühlen der Lösung kristallin als Verunreinigung ausfällt. Im Vergleich zur Kalilauge wird durch die Natronlauge die Reaktionsdynamik beschleunigt und das Einstellen des Prozessgleichgewichtes schwieriger.

Natronlauge, Seignette und eine Reaktionstemperatur von 56–58 °C bilden zusammen mit dem Lösungsmittel Wasser das Reaktionsumfeld. Sie werden als Werkzeuge betrachtet, mit denen ein Salz (Kupfersulfat) zurück zu einem Oxid reduziert wird. Mit der Reduktion wird das Kupfer entgegen den Verwitterungsprozessen in der Natur zurück auf eine metallischere Stufe gehoben. In der Natur bilden sich aus primären Erzen sekundäre Erze, die sich weiter zu Salzen zersetzen. Unser Kupferprozess beginnt in der Natur mit dem primären Kupferkies (Chalkopyrit, einem Kupfer-Eisen-Sulfid) und läuft über die sekundäre Stufe des Cuprit (Kupfer(I)-oxid) und weiter zum salzartigen Kupfersulfat.

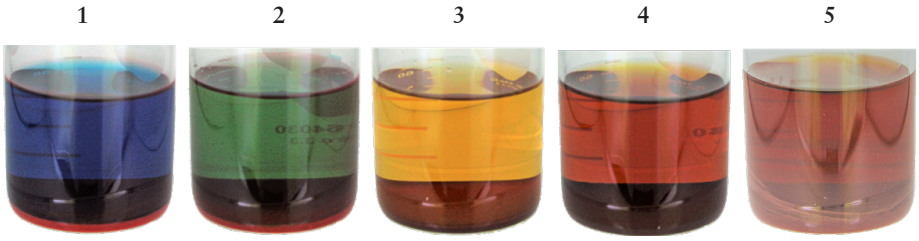
Farbe von Kupfer(I)-oxid und Reaktionslösung

Das Farbspektrum des Kupfer(I)-oxids reicht, in Abhängigkeit von der Partikelgrösse, von gelb bis dunkelviolett.

gelb	orange	rot	braun-rot	dunkelviolett
< 0.5 µm	1 µm …	2.5 µm ….	…	… > 50 µm

Tab. 3: Farbspektrum des Kupfer(I)oxids.

Bei der Fehling-Reaktion wird jede Farbe in diesem Farbspektrum als positives Resultat, d.h. als Nachweis von reduzierenden Zuckern gewertet. Mit der WALA-Synthese wird eine rein rote Farbe angestrebt. Es müssen entsprechende Prozessbedingungen mit passender Reaktionsdynamik gefunden werden, in denen Kristalle im unteren μm-Bereich mit einer möglichst schmalen Partikelgrössenverteilung entstehen.



	Glas 1	Glas 2	Glas 3	Glas 4	Glas 5
Natronlauge	-20 %	-10 %	Standard	+10 %	+20 %
Überstand	blau	grün	hellgelb	orange-gelb	dunkelbraun
Niederschlag	rot	braun-rot	dunkelbraun	dunkelbraun	schwarz-grau

Abb. 5 und Tab. 4: Variationsreihe mit unterschiedlichen Mengen Natronlauge von 20 % weniger (Glas 1) bis 20 % mehr (Glas 5). Standzeit 24 Stunden bei 60 °C.

Anhand der Farbe des Kupfer(I)-oxids und der Reaktionslösung kann der Verlauf der Redoxreaktion verfolgt werden. Bei Bedingungen, in denen das Kupfer(I)-oxid zu Beginn im gewünschten Rot ausfällt, ändert sich die Farbe von Niederschlag und Überstand in Funktion der Temperatur, der Standzeit und der Konzentrationen von Natronlauge und Glucose. In der Natronlauge-Konzentrationsreihe bei 60 °C nach 24 Stunden ist das ganze Farbspektrum zu sehen (Abb. 5 und Tab. 4). Blau bedeutet, Kupfer-Tartrat-Komplexe sind vorhanden, Grün ist Mischfarbe aus Blau und Gelb, Gelb bis Braun bedeutet, Abbauprodukte von Glucose und Tartrat sind vorhanden. Angestrebt werden Verhältnisse, bei denen das Kupfer(I)-oxid so rot ausfällt, wie bei Glas 1 und der Überstand ein noch helleres Gelb aufweist als bei Glas 3.



Abb. 6: Rotes Kupferoxid.

Reaktionsdynamik

Die Reaktionsdynamik lässt sich dank der entstehenden Farben unmittelbar erfahren. Die molekulare Theorie gibt Orientierung. Die Ergebnisse der Versuche treffen auf die bisherigen Erfahrungen, bestätigen diese oder auch nicht, führen in «Neuland». Es folgt eine «Reaktionsdynamik» von Überlegungen zur Erhellung der Geschehnisse. Über einige Parameter wird probeweise Gewissheit erlangt, andere verbleiben im Experimentierfeld. Basierend auf den entstandenen Fragen in Abwägung mit möglichen Antworten, wird der nächste Versuch entworfen. Mit der Zeit tauchen, in Kongruenz mit einem ab und zu erreichten roten Kupferoxid, Vermutungen über Zusammenhänge auf. Diese Kontexte formen gedankliche Räume für die im Experiment erfahrenen Wirksamkeiten. Die experimentelle und gedankliche «Lebendigkeit», mit der die an sich starre Reaktionsgleichung begleitet wird, macht die erfolgreiche Umsetzung aus.

Kontexte der Reaktionsdynamik

Die Reduktion von Kupfer(II) zu Kupfer(I) mit Glucose und die Sauerstoffaufnahme müssen getrennt betrachtet werden. Kupfer(II) wird bei viel Glucose und Natronlauge zuerst zu Kupfer(I) und dann zum metallischen Kupfer reduziert. Auf molekularer Ebene betrachtet, läuft die Sättigung des Kupfers mit Sauerstoff über den Zwischenschritt, dass sich zwei Kupfer(I)-ionen gemeinsam mit einem Sauerstoffion zu einer Cu_2O-Einheit verbinden und als solche in ein Kristallgitter einordnen (Abb. 2, S. 41). Die Sauerstoffaufnahme ins Kristallgitter läuft aber darüber hinaus, bis bei einem Kupfer-Sauerstoff-Verhältnis von 1:1 das stabilere Kupfer(II)-oxid, d.h. CuO, erreicht wird. Bei den gewählten Synthesebedingungen stellen metallisches Kupfer und Kupfer(II)-oxid irreversible Endpunkte dar. Zudem besteht die Gefahr, dass, wenn das reduktive Potential und der Tartrat-Schutz im alkalischen Milieu nachlassen, Kupfer(I)-oxid wieder oxidiert wird und als weisslich-blaues Kupfer(II)-hydroxid ausfällt. Hinzu kommt, dass die Farbe des Kupfer(I)-oxids von der Partikelgrösse bestimmt wird, die wiederum von der Reaktionsgeschwindigkeit abhängt. Bei kurzen Reaktionszeiten entstehen kleine Partikel, bei langsamen Reaktionen grössere. Die Einheitlichkeit der Partikelgrösse hängt mit der Kontinuität der Reaktionsgeschwindigkeit zusammen, wobei kleine Kupfer(I)-oxid-Kristalle dazu tendieren, mit anderen zu grösseren Kristallen zusammenzuwachsen. Rotes Kupferoxid scheint, bildlich gesprochen, im Feld von Redoxgeschehen und Kristallgrösse auf einer Anhöhe zu balancieren. Es droht in jedem Moment auf eine unerwünschte Seite abzurutschen. Auf der Anhöhe erreicht es, gefühlt, Perfektion.

Der Einsatz der Substanzen und die Regulierung der Reaktion müssen auf die Zeitstruktur des Geschehens ausgerichtet werden. Die Zeitstruktur kann mit der Wahl verschiedener Konzentrationsverhältnisse der Substanzen, Reihenfolgen der Zugabe und Temperaturführungen verändert werden. Die Umsetzung von Kupfer(II)-sulfat zu Kupfer(I)-oxid sollte zügig und kontinuierlich verlaufen, aber die Reaktion am Endpunkt, wenn alles Kupfer(II)-sulfat verbraucht ist, möglichst wenig überschiessen. Mit Berücksichtigung der WALA-internen Möglichkeiten wurde versucht, konzentrierte Ansätze zu fahren, um die Ansatzmengen klein zu halten.

Die Reduktion beginnt, wenn alle Ausgangsstoffe zugegeben sind. Es bietet sich an, mit einer dosierten Zugabe der letzten Substanz die Reaktionsdynamik zu steuern. Natronlauge und Glucose dürfen nur kurzfristig miteinander in Berührung kommen, da die Natronlauge die Glucose zersetzt. Eines davon wird die letzte Zugabe-Substanz sein müssen. Der Komplexbildung wegen müssen Wasser, Seignette und Kupfersulfat gemeinsam im Reaktionsgefäss vorliegen. Die Natronlauge wird bei der Redoxreaktion verbraucht, so dass das alkalische Milieu immer schwächer wird. Dabei kann die Grenze unterschritten werden, unterhalb derer die Reaktion nicht mehr abläuft. Zur Steuerung muss ein Teil der Natronlauge vorgelegt werden, um das Redoxmilieu zu erreichen, und es muss weitere Natronlauge zudosiert werden, um die Reaktion am Laufen zu halten. Die Steuerung der Redoxbedingungen mit Natronlauge bei vorgelegter Glucose erweist sich jedoch als zu wenig präzise. Mit der Zugabe von Glucose lässt sich die Synthese besser unter Kontrolle halten. Die Glucose muss gerade so schnell zudosiert werden, wie sie unmittelbar für die Redoxreaktion verbraucht wird – dann bildet sich Kupfer(I)-oxid mit der gewünschten roten Farbe. Es darf kein Überschuss an Glucose entstehen, damit sie einerseits nicht der Natronlauge zum Opfer fällt und andererseits bei zu hoher Reaktionsgeschwindigkeit nicht die falsche Kupferoxid-Farbe entsteht. Bei zu langsamer Zugabe wird die Reaktionszeit zu lang, die heisse Natronlauge greift das Seignette-Salz immer stärker an und lässt eine Folge von Abbauprodukten entstehen.

Die Temperatur regiert sämtliche Vorgänge. Jedes Grad Unterschied führt zur Verschiebung der Reaktionsdynamik, was Veränderungen der Konzentrationsverhältnisse und der optimalen Geschwindigkeit, mit der die letzte Substanz zugegeben wird, nach sich zieht. Die Diffusionsgeschwindigkeit der Temperatur in der Reaktionslösung erweist sich als entscheidender Faktor. Ansatzgrösse, Abmessungen, Heiz- und Kühlkapazität des Reaktionsgefässes und Rührergeschwindigkeit müssen zueinander passend gewählt werden. Die Temperaturregulierung durch Heizen und Kühlen an der Reaktoraussenseite erweist sich als viel zu träge, um die Temperatur während des Prozesses exakt zu führen. Deshalb wird eine möglichst kon-

stant bleibende Anfangstemperatur mit kleiner Schwankungsbreite von +/- 1 °C veranschlagt.

Synthese

Aus der Zusammenschau aller Versuche wurde ein Synthese-Setting erarbeitet, in dem jeder Parameter seinen Platz und seine Funktion einnimmt und nichts geändert werden darf, ohne andere Parameter ebenfalls ändern zu müssen. Die Reproduzierbarkeit der Reaktion bei dem gewählten Setting ist sehr gross. Hierin zeigt sich im Kontrast zur fast allgegenwärtigen Labilität eine erstaunliche Stabilität und Perfektion.

Was tatsächlich in der Reaktionslösung passiert, ist nicht nur messtechnisch schwer zugänglich, sondern liegt auch ausserhalb unserer sinnlichen Wahrnehmungsmöglichkeiten. Aus dem Vergleich der real verbrauchten Stoffmengen mit der stöchiometrischen Reaktionsgleichung lassen sich Überlegungen zum chemischen Geschehen festmachen.

	Stoffmengen [Mol]	**Bemerkungen**
Wasser	176	Minimalmenge, bei der die Salze noch in Lösung sind
Seignette	4,42	Minimalmenge, bei der noch kein Kupfer(II)-hydroxid ausfällt
NaOH	5,04	Menge genügend, um das alkalische Milieu zu sichern
Glucose	0,62	Empirischer Wert kleiner als theoretischer Wert (1,0)
$CuSO_4$ 5 H_2O	2,0	Bezugswert des Vergleichs = 2,0 Mol
Cu_2O	1,0	100 kg Kupfersulfat Pentahydrat ergeben 29 kg Rotes Kupferoxid

Tab. 5: Stoffmengen [Mol] der eingesetzten Substanzen bezogen auf Kupfer(II)-sulfat.

Reaktionsgleichung mit theoretischen Verhältnissen der Stoffmengen:

2 x Kupfersulfat + 1 x Glucose + 4 x Natronlauge
→ 1 x Rotes Kupferoxid + 1 x Gluconsäure + 2 x Wasser

Die Ansatzgrösse ist durch die Menge des Lösungsmittels Wasser und diese vor allem durch die grosse Menge des zu lösenden Seignette-Salzes gegeben. Um die Ansatzgrösse klein und damit die Temperaturführung flexibler zu halten, wird so wenig Seignette wie möglich verwendet. Die Wassermenge wird so weit reduziert, dass sich die Salze Seignette und Kupfersulfat gerade

noch lösen. Die Natronlauge-Menge ist etwas grosszügiger berechnet, um bis zum Reaktionsende das alkalische Milieu nicht unter pH 10 sinken zu lassen. Allerdings sollte im alkalischen Milieu theoretisch noch 1 x Natronlauge für die Neutralisation von 1 x Gluconsäure verbraucht werden. Damit käme man insgesamt auf 5 x Natronlauge, und das Milieu wäre neutral. Die Unstimmigkeit zwischen dem tatsächlichen Erhalt des alkalischen Milieus in der Reaktionslösung und der nach der chemischen Gleichung aufgebrauchten Natronlauge wurde nicht weiterverfolgt. Die Glucose wird als 25%ige Lösung langsam zugegeben, bis alles Kupfersulfat verbraucht ist. Gegen Reaktionsende wird mit einer Pipette eine Probe genommen. Der Überstand soll gerade nicht mehr blau und erst ganz hellgelb sein, dann ist der Endpunkt erreicht und das rote Kupferoxid kann filtriert, mit Wasser gewaschen und getrocknet werden. Das reale Stoffmengen-Verhältnis von 0,62 Glucose liegt deutlich tiefer als der theoretische Wert von 1,0. So müssen weitere reduzierende Substanzen aus den Abbaukaskaden von Glucose und Seignette vorliegen. Zumindest der unkontrollierte Glucoseabbau wird sinnlich wahrnehmbar: die gelbe Farbe des Überstandes wird immer dunkler und bei einem Überschuss an Glucose – und sei er noch so klein – beginnt die Reaktionslösung nach Karamell zu riechen. Einerseits ergeben sich aus den weiterlaufenden Abbaureaktionen aufgrund des alkalischen Milieus Probleme, andererseits läuft die Reduktion mit weniger Natronlauge nicht vollständig ab. Hier wurden Kompromisse geschlossen.

Das Ziel wurde erreicht: eine Synthese von Rotem Kupferoxid mit hoher Ausbeute, einem leuchtenden Rot (Abb. 6, S. 48) und einer schmalen Partikelgrössenverteilung (Abb. 7).

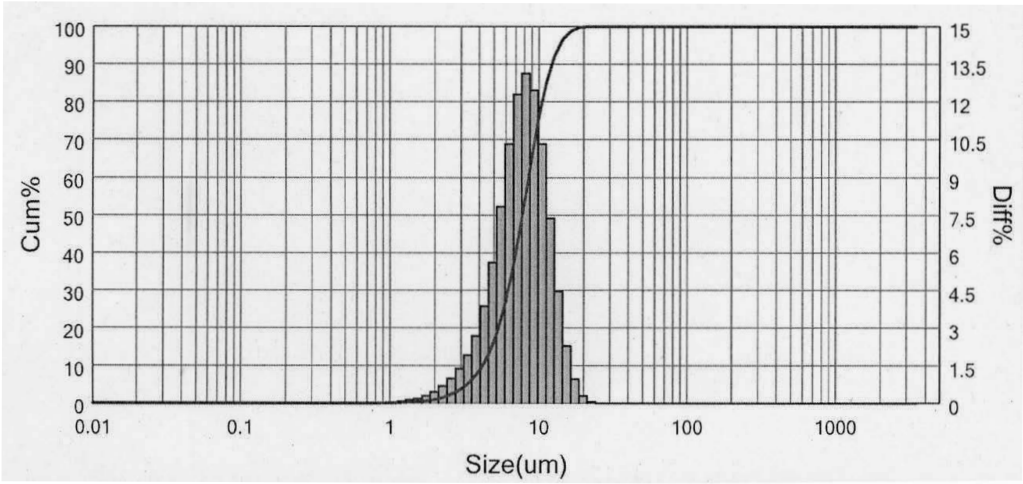


Abb. 7: Partikelgrössenverteilung des Roten Kupferoxids.

Rückblickend

Es wurde versucht, das Pendeln zwischen Theorie und Praxis aufzuzeigen. Die Empfindlichkeit der Reaktionsdynamik und das Suchen nach einem gangbaren Weg bieten vielfältige Spielräume für Betrachtungen der objektiven Aussen- und der subjektiven Innenwelt. Die äussere Werkwelt, wie Steiner sie nennt (*Steiner* 1924), löst sich während des Tuns immer wieder etwas auf, lässt ein Sinnen über die Wirksamkeiten durchscheinen, lässt ein empfindendes Wahrnehmen in Bildern zu. Das Erstaunliche ist, dass man so weiterkommt.

Die Theorie bietet Rückhalt bei der Verzweiflung über wieder einmal nicht gelungene Versuche. Die Praxis bietet plastizierbares Material für neu gefasste Ideen, verwirklicht diese, lässt Abweichungen vom Ideal zur Ernüchterung gerinnen und ist immer wieder bereit für Neuanfänge. Wie eine Pflanze auf der Grundlage des Erdbodens «mit Freude» in die Höhe der Sonne entgegenwächst, beginnen sich die Synthese-Ideen zu entwickeln. Blatt um Blatt, Schritt um Schritt, Erfahrungswert um Erfahrungswert geht sowohl äusseres wie inneres Wachstum weiter, Metamorphosen der Gestalt werden sichtbar. Es gibt Verzweigungen, die nicht weiterführen. An der Vertikalen des Haupttriebs wird weitergearbeitet. Mit der Zeit setzt eine Konsolidierung ein. Es muss mehrmals «gekocht» und reproduziert werden. Die Wärme der Fruchtbildung staucht das Pflanzenwachstum. Die chemische Synthese nähert sich einer festzuhaltenden Vorschrift und kann schlussendlich als solche «geerntet» werden. Doch wie sich bei jedem Samen die neu wachsende Pflanze erst mit der aktuell vorhandenen Umwelt auseinandersetzen muss, gibt es eigentlich auch in der Chemie keine Garantie für das Gelingen in der Zukunft. Jedes nächste Mal muss sich von Neuem beweisen und in der Realität bestehen. Sicherheit bietet die gewonnene Erfahrung, mit der bei neu auftauchenden Problemen gehandelt werden kann.

Die Synthese-Entwicklung, die ich zunächst in der Werk-Welt ansiedeln möchte, lässt sich mit Wachstumsbewegungen analog zum Pflanzenwachstum beschreiben. In beiden Fällen führt das Wachstum zu einer Gestalt in der physischen Realität, das eine Mal entsteht eine Pflanze, das andere Mal eine Synthese-Vorschrift.

Ich möchte nach diesen Ausführungen zur Diskussion stellen, ob beim Entwickeln einer chemischen Synthese, allgemein formuliert beim Entwickeln eines Prozesses in der Werk-Welt, ätherische Bildekräfte mit und durch den Menschen wirksam werden und dem Prozess eingeprägt werden. Beobachtungen der inneren Beteiligung am chemischen Geschehen legen nahe, dass es die Schritt für Schritt gewonnene Erfahrung ist, die im Feld der Wirksamkeit, d.h. auf der Ebene der Ätherkräfte anzusiedeln ist. Diese Erfahrung ist weder sichtbar noch als Idee erfahrbar. Sie ist vielmehr als

Reservoir von Impulsen zu sehen, die danach streben, mein Tun, sei es gedanklich oder praktisch, zu durchdringen. Die Erfahrung gerinnt in die Werk-Welt in Form des Entstandenen und der Beschreibung, was zu tun ist, worauf Nachfolgende aufbauen können.

Bei der Tätigkeit der Synthese-Entwicklung spiegeln sich Erfahrung und chemische Vorgänge – im Sinne einer von Steiner beschriebenen «lebendig gewordenen Chemie» (*Steiner* 1923) – im Ätherischen. Der Mensch hat die Übersicht über das Geschehen. Mit seinen seelisch-emotionalen Fähigkeiten und seiner Ich-Kraft begleitet er sowohl die chemischen Prozesse, wie auch den Erwerb von Erfahrung. Die Erfahrung bildet die Grundlage für Fähigkeiten, mit anderen Worten von Potentialen. Man spricht auch bei Substanzen und im Lebendigen von Potentialen und meint damit, für mögliche Wirkungsweisen bereit zu sein und wirksam werden zu können. Mit dem Begriff «Potential» kann eine auf einer Bedeutung beruhende Brücke zwischen der Situation der Innenwelt und der Aussenwelt geschlagen werden. Schaut man von der Brücke zurück auf die Substanzseite, stellt sich die Frage, ob und wie analog zur inneren Welt eine Erfahrungsbildung bei Substanzen zu denken ist. Diese Frage kann im Zusammenhang der Synthese-Entwicklung nicht beantwortet werden.

Literatur

Greenwood, N.N., Earnshaw, A. (1997): Chemistry of the Elements. Second Edition. Elsevier, Amsterdam.

Jespersen, N.D. (1972): Novel Copper-Tartrate Coordination Compounds. Anal. Lett. *5*, S. 497–508.

Jurgeleit, R. (2020): Kupfervermittelte Sauerstoffaktivierung. Kupfervermittelte Sauerstoffaktivierung – Institut für Anorganische Chemie (www.uni-kiel.de).

Kaim, W., Schwederski, B. (2010): Bioanorganische Chemie. 4. Auflage, Wiesbaden.

Kuo, C.-H., Huang, M.H. (2010): Morphologically controlled synthesis of Cu_2O nanocrystals and their properties. Nano today *5*, S. 106–116.

Steiner, R. (1921): Menschenwerden, Weltenseele und Weltengeist. Vortrag vom 1.7.1921. 2. Auflage, Dornach 1987, GA 205.

Steiner, R. (1923): Vom Wesen der Farben. Vortrag vom 21.2.1923. 4. Auflage, Dornach 1991, GA 291, S. 156.

Steiner, R. (1924): Anthroposophische Leitsätze. Leitsätze 112–114 vom 2.11.1924. 10. Auflage, Dornach 1998, GA 26.

Waldburger, B. (2018): Salz – zum Verständnis von Formbildung und Bewusstseinsbildung. Elemente d. N. 109, S. 36–50.

Wu, Y.A. et al. (2019): Facet-dependent active sites of a single Cu_2O particle photocatalyst for CO_2 reduction to methanol. Nature Energy 4, S. 957–968. Scientists create 'artificial leaf' that turns carbon dioxide into fuel | Waterloo News | University of Waterloo (www.uwaterloo.ca)
Vogel, H.-H. (1994): Wege der Heilmittelfindung. Bd 2. Bad Boll.

Danksagung

Ich möchte Martin Rozumek und Florian Stintzing meinen herzlichen Dank aussprechen für die sorgfältige Durchsicht des Manuskriptes und die wertvollen Anregungen.

Beatrix Waldburger
Erlengarten 9
DE – 73087 Bad Boll
beatrix.waldburger@bluewin.ch