

# **Die Verwendung von Kronenethern zum carriervermittelten Transport von Ionen - Modellexperimente zum Durchtritt von Ionen durch eine Biomembran**

Matthias Ducci und Marco Oetken

Es werden Experimente zum Durchtritt von Ionen in unpolare Phasen vorgestellt, die den carriervermittelten Transport von Ionen durch Biomembranen in das Innere der Zelle modellhaft veranschaulichen können. Durch geeignete Visualisierungen werden die Vorgänge auf der submikroskopischen Ebene schülerorientiert dargestellt.

## **1. Einleitung**

In einem vorangegangenen Beitrag „Zur Redoxchemie und Toxikologie von Chromverbindungen“ haben wir eine Unterrichtseinheit im Rahmen des von uns entwickelten modifizierten Anchored Instruction-Ansatzes beschrieben, bei der die Thematik an dem Spielfilm „Erin Brockovich“ verankert wird [1, 2].

In dem Spielfilm wird einer der größten Umweltskandale in den USA der 1990er Jahre geschildert, bei dem es zu extrem gehäuften Krebserkrankungen bei Menschen in der kleinen kalifornischen Gemeinde Hinkley kam, die offensichtlich im Zusammenhang mit chromhaltigem Trinkwasser stehen. Recherchen haben schließlich ergeben, dass von der Firma PG&E (Pacific Gas & Electric) jahrelang Chrom(VI)-Verbindungen in das Grundwasser abgeleitet wurden.

In der Unterrichtseinheit werden die Leitfragen zur Toxizität von Chrom(VI)-Verbindungen im Vergleich zur relativen Unbedenklichkeit von Cr(III)-Verbindungen problemorientiert aufgeworfen und experimentell erarbeitet. Dabei wird mit den Schülern erarbeitet, dass es in der Biomembran menschlicher Zellen offensichtlich einen geeigneten Carrier-Mechanismus geben muss, der in der Lage ist, das Chromat-Ion – analog des Sulfat-Ions – durch die Biomembran in das Innere der Zelle zu schleusen.

In diesem Zusammenhang wäre es im Unterricht hilfreich, wenn man den Schülern auch ein anschauliches Modellexperiment für den Durchtritt von Ionen durch Biomembranen - d.h. die Permeation von Ionen durch eine unpolare Phase - demonstrieren könnte. Mit der Entdeckung der sog. Kronenether durch Pedersen im Jahr 1967 besteht eine experimentell recht einfache und für Schüler anschauliche Möglichkeit, den Transport von Ionen durch eine Biomembran modellhaft nachzustellen.

## **2. Entdeckung, Struktur und Eigenschaften von Kronenethern**

Kronenether (Coronanden) sind cyclische Polyether deren Sauerstoffatome über Ethanbrücken verknüpft sind. Sie wurden 1967 per Zufall von dem Amerikaner Charles J. Pedersen entdeckt, der hierfür 1987 (zusammen mit Donald J. Cram und Jean-Marie Lehn) mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet wurde.

Pedersen versuchte, mit der Reaktion von Bis(2-chloroethyl)ether mit einem partiell (an einer OH-Gruppe) geschützten Brenzcatechin, welches mit ungeschütztem Brenzcatechin verunreinigt war, ein nichtcyclisches Benzolderivat (Bis[2-(o-hydroxyphenoxy)ethyl]ether) zu synthetisieren; dabei entstand neben dem gewünschten Produkt mit 0,4 % Ausbeute der cyclische Ether (4)

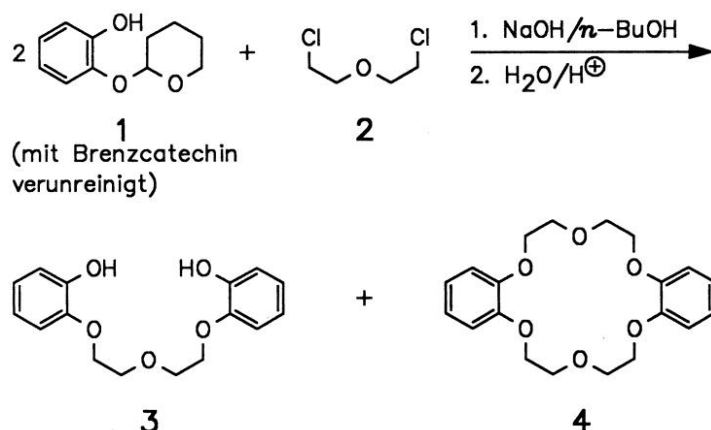


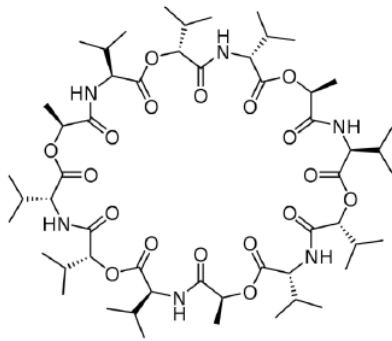
Abb. 1: Synthese eines Kronenethers nach Pedersen [3]

Pedersen stellte fest, dass der cyclische Ether recht ungewöhnliche Eigenschaften zeigt; so ist er unlöslich in Methanol, löst sich allerdings nach Zugabe von Natrium- oder Kaliumsalzen. Zudem fand Pedersen, dass Natrium- und Kaliumsalze in unpolaren Lösungsmitteln wie Benzol oder Chloroform nach Zusatz eines Kronenethers gelöst werden können. Er erklärte dies dadurch, dass der Kronenether das Kation des Salzes komplexiert. Aus Elektroneutralitätsgründen muss das Anion dem solvatisierten Kation dann in die organische Phase folgen.

*„Darüber hinaus bemerkte ich, dass die fasrigen Kristalle in Gegenwart von NaOH sehr gut in Methanol löslich waren. Das war höchst merkwürdig, da die Verbindung keine freie OH-Gruppe enthielt, wie sich durch ihre IR- und NMR-Spektren nachweisen ließ. Dann fand ich heraus, dass sich die Verbindung in Methanol löste, sobald ein beliebiges Natriumsalz gelöst zugegen war. (...). Von da an war mir klar, daß das Natrium-Ion in das Loch in der Mitte des Moleküls „gefallen“ war und dort durch elektrostatische Wechselwirkung zwischen seiner positiven Ladung und den sechs negativ polarisierten Sauerstoffatomen, die sich symmetrisch um das Loch gruppieren, festgehalten wurde.“*

[4, S. 1056 ]

Einige Zeit vor Pedersens Entdeckung sind bestimmte Naturstoffe bekannt geworden, die ebenfalls in ihrem Molekülinneren Alkalimetallkationen aufnehmen und durch Biomembranen transportieren (Ionophor) können z.B. das Valinomycin, welches 1955 aus *Streptomyces fulvissimus* isoliert wurde, und damit wichtige Transportmechanismen für die Antibiotika-Therapie darstellen.



**Abb. 2: Strukturformel des Ionophors Valinomycin [5]**

Ähnlich wie das Valinomycin verfügen auch die Kronenether über eine sogenannte Hydrophilie-Lipophilie-Balance. Dieser Zustand bedingt die universellen Löslichkeitseigenschaften dieser Stoffklasse. Das bedeutet, dass Kronenether über entsprechende Konformationsänderungen die Fähigkeit haben, sich sowohl in hydrophilen Medien als auch in lipophilen Medien (Dichlormethan, Chloroform) gut zu lösen. In hydrophilen Medien werden die polaren Sauerstoffenden der Kronenether nach außen gekehrt, in lipophilen Medien ist die Molekularpolarität entsprechend umgekehrt.

Ein Blick auf die Abb. 1 zeigt, dass bei einem Kronenether die Sauerstoffatome nach innen gerichtet sind, während die unpolaren CH<sub>2</sub>-Gruppen nach außen zeigen. Der Kronenether ist somit in lipophilen Medien wie z. B. Dichlormethan oder Chloroform löslich. Darüber hinaus entsteht ein hydrophiler, elektronenreicher Hohlraum, der zur Komplexierung spezifischer Kationen geeignet ist.

Mit den Kronenethern stehen damit im Unterricht „Transportvehikel“ zur Verfügung, mit denen sich im Experiment der Transport von Ionen aus einer hydrophilen (wässrigen) Phase durch eine unpolare Phase in eine hydrophile Wasser modellhaft veranschaulichen lassen sollte.

### **3. Modellexperimente zum Ionentransport durch eine Biomembran**

Die im Folgenden dargestellten Versuchseinheiten beschreiben ein Modellsystem, mit dem es möglich wird, den Transport von Stoffen (Moleküle, Ionen etc. ) durch Biomembranen zu veranschaulichen und gleichzeitig die Funktion von

Biomembranen als Trennschicht zwischen verschiedenen wässrigen Bereichen innerhalb einer lebenden Zelle oder auch zwischen dem Zellinneren und dem Zellaußenraum deutlich werden zu lassen.

In Anlehnung an den Beitrag „Redoxchemie und Toxikologie von Chromverbindungen“ [2] soll mit den folgenden Experimenten unter anderem gezeigt werden, dass es möglich ist, Chrom(VI)-Ionen mit Hilfe von Kronenethern aus einer wässrigen Phase durch eine unpolare Phase zu transportieren und in eine sich anschließende wässrige Phase zu überführen. Der Grundaufbau dieser Experimente ist erstmals in [6] am Beispiel des Durchtritts von Permanganat-Ionen durch eine Chloroformphase beschrieben worden. Zunächst wird experimentell überprüft, ob der Durchtritt von Permanganat-Ionen auch in dem weniger problematischen Lösungsmittel Dichlormethan gelingt und zudem auf den Transport von Chromat-Ionen angewendet werden kann. Weiterhin soll die Selektivität des Ionentransports durch Kronenether experimentell untersucht werden.

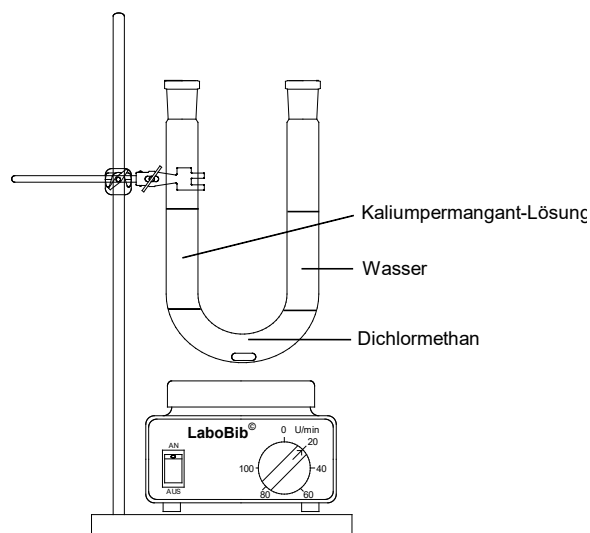
### Versuch 1: Permeation von Kaliumpermanganat durch Dichlormethan

#### *Geräte und Chemikalien:*

U-Rohr, 2 Messpipetten (5 mL), Vollpipette (20 mL), 2 mL Spritze mit 12 cm langen Kanüle, Magnetrührer, spezieller kleiner Rührfisch (bestellbar z. B. bei Fa. Roth, Best-Nr. 0955.2, 10 St. Kosten 13,10 €), Kronenether (1[8]-Krone-6-Ether)-Lösung ( $0,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  in  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ , Gesundheitsgefährdend), Dichlormethan (Gesundheitsgefährdend), Kaliumpermanganat-Lösung,  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (Gesundheitsgefährdend), dest. Wasser

#### *Durchführung:*

Die Apparatur wird entsprechend der Abb. 3 aufgebaut.

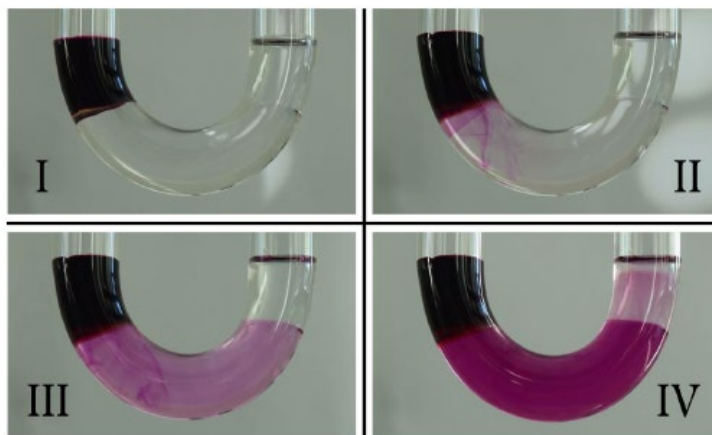


### Abb. 3: Versuchsaufbau zum Ionentransport durch Kronenether

Zunächst werden mit der Vollpipette 20 mL Dichlormethan in die Mitte des U-Rohrs pipettiert. Jetzt wird der Rührfisch in die Mitte des U-Rohrs platziert. Vorsichtig werden mit einer Messpipette in den rechten Schenkel des U-Rohrs 5 mL Wasser, in den linken Schenkel 5 mL der Kaliumpermanganat-Lösung aufgeschichtet. Anschließend erfolgt mit der mit einer langen Kanüle versehenen Spritze vorsichtig (!) die Zugabe von 1 mL Kronenether-Lösung durch die wässrige Phase des rechten Schenkels in die Dichlormethanphase. Der Magnetrührer wird eingeschaltet und auf die höchste Rührstufe eingestellt.

#### Beobachtung und Auswertung:

Nach bereits kurzer Zeit beobachtet man violett gefärbte Schlieren in der unpolaren Phase, deren Intensität mit der Versuchsdauer deutlich zunimmt. Nach etwa 10 min erkennt man eine Violettfärbung der wässrigen Phase im rechten Schenkel des U-Rohrs; vergl. Abb. 4)



**Abb. 4: Transport von Permanganat-Ionen durch Dichlormethan nach Zugabe von [18]-Krone-6-Lösung. Die Bilder wurden (I) 1 Sekunde, (II) 1 Minute, (III) 5 Minuten und (IV) 20 Minuten nach Zugabe des Ethers aufgenommen.**

Der Kronenether übernimmt im Modellexperiment offensichtlich die gewünschte Funktion eines Carriers der Biomembran und lagert ein Kalium-Ion in das Innere des Etherings ein.

Der Kronenether [18]-Krone-6 kann mit einem Hohlraumdurchmesser von 260-320 pm genau ein Kalium-Ion (266 pm) einlagern und dient in diesem Experiment als Modellsubstanz für einen spezifisch wirkenden Ionen-Carrier in einer Biomembran. Aus Gründen der Elektroneutralität wandern die unsolvatisierten Permanganat-Ionen quasi Huckepack als assoziierte „nackte Ionen“ ebenfalls mit, wodurch der Transport durch die unpolare Phase farblich sehr schön von den Schülern verfolgt werden kann.

Mit Hilfe einer Modellbetrachtung lassen sich die Vorgänge auf der submikroskopischen Ebene im Unterricht visualisieren.

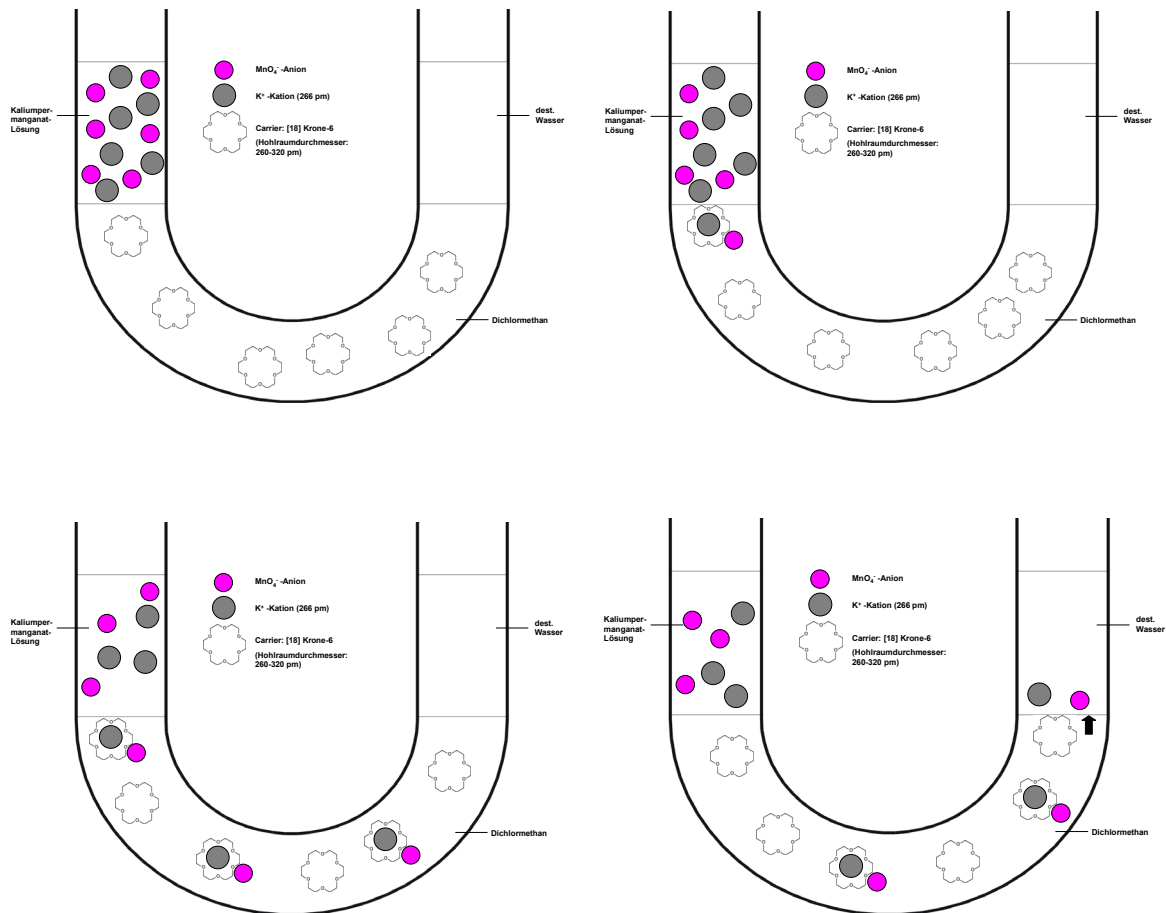


Abb. 5: Modellbetrachtung der Permeation von Kaliumpermanganat durch Dichlormethan nach Zugabe von [18]-Krone-6-Lösung

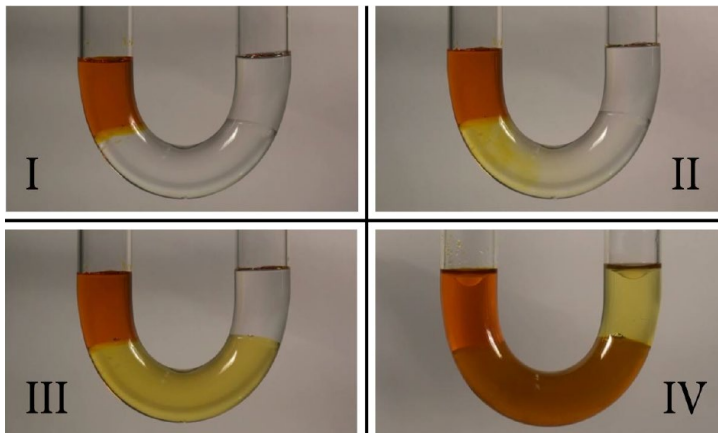
## Versuch 2: Permeation von Kaliumchromat durch Dichlormethan

### Geräte und Chemikalien:

Wie in Versuch 1, zusätzlich Kaliumchromat-Lösung,  $0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (Gesundheitsschädlich, Gesundheitsgefährdend, Umweltgefährdend), Schwefelsäure,  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (Ätzend)

### Durchführung:

Die Durchführung erfolgt exakt so wie in Versuch 1 beschrieben. Allerdings wird vor dem Einpipettieren der Kronenether-Lösung die Kaliumchromat-Lösung durch Zugabe einiger Tropfen Schwefelsäure angesäuert.



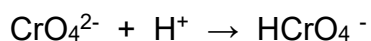
**Abb.6: Transport von Kaliumchromat durch Dichlormethan nach Zugabe von [18]-Krone-6-Lösung. Die Bilder wurden (I) 1 Sekunde, (II) 1 Minute, (III) 30 Minuten und (IV) 60 Minuten nach Zugabe des Ethers aufgenommen.**

Beobachtung und Auswertung:

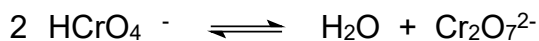
Zunächst lässt sich keine Farbänderung in der unpolaren Phase beobachten. Durch das Ansäuern der gelb gefärbten Kaliumchromat-Lösung mit Schwefelsäure entsteht eine deutlich orange gefärbte Lösung (Abb. 6).

Nun lässt sich nach kurzer Zeit die Bildung gelb gefärbter Schlieren in der unpolaren Phase beobachten, deren Intensität mit der Versuchsdauer deutlich zunimmt; nach ca. 30 Minuten ist die gesamte Dichlormethanphase gelb gefärbt. Nach längerer Versuchsdauer ist schließlich auch eine Gelbfärbung der wässrigen Phase im rechten Schenkel des U-Rohrs zu erkennen.

Die zunächst nicht zu beobachtende Gelbfärbung der unpolaren Phase (und damit der nicht erfolgte Durchtritt der Chromat-Ionen mittels Kronenether) ist mit der unterschiedlichen Ladung der Ionen zu erklären: während das Permanganat-Ion einfach negativ geladen ist, liegt das Chromat-Ion hingegen zweifach negativ geladen vor, der Transport eines zweifach negativ geladenen, unsolvatisierten Ions durch eine unpolare Phase ist energetisch sehr schwierig und findet unter diesen Bedingungen daher nicht statt. Durch das Ansäuern entstehen Hydrogenchromat-Ionen, die mit Dichromat-Ionen im Gleichgewicht stehen (orange Färbung der Lösung). Das gemäß der Gleichung



primär entstehende Hydrogenchromat-Ion spaltet in wässriger Lösung Wasser ab, sodass folgendes Gleichgewicht vorliegt:



In Gegenwart der Hydrogenchromat-Ionen übernimmt der Kronenether im Modellexperiment erneut die gewünschte Funktion eines Carriers in der Biomembran, lagert ein Kalium-Ion in das Innere des Ethernings ein und schleust assoziierte unsolvatisierte Hydrogenchromat-Ionen durch die unpolare Phase. Auch hier lassen sich die Vorgänge auf der submikroskopischen Ebene im Unterricht schülerorientiert visualisieren:

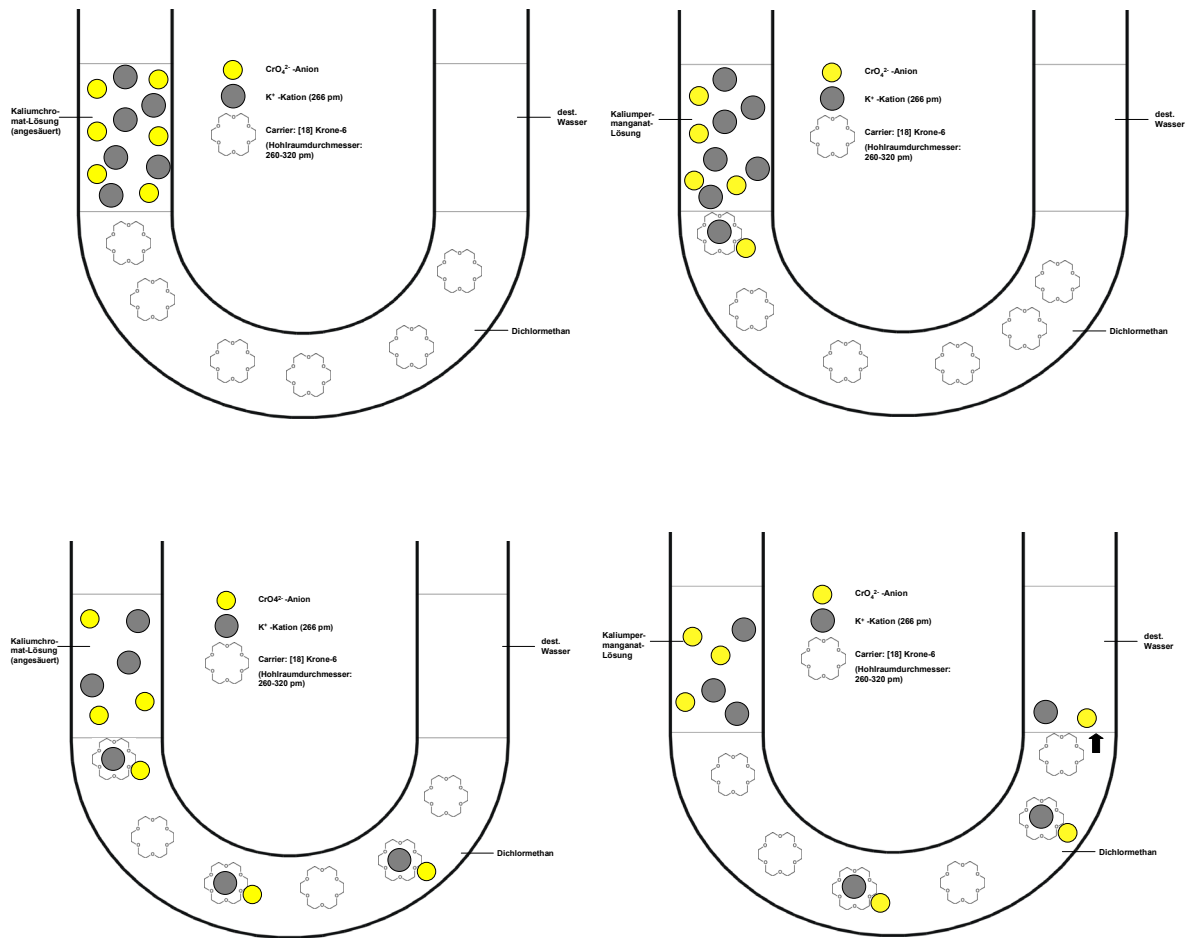


Abb.7: Modellbetrachtung des Transports von Kaliumchromat durch Dichlormethan nach Zugabe von [18]-Krone 6

Die Permeation von Ionen durch eine unpolare Phase und der Eintritt in eine polare Phase lässt sich modellhaft auch durch die Verwendung von Kaliumiodid experimentell recht schön zeigen.

### Versuch 3: Permeation von Kaliumiodid durch Dichlormethan

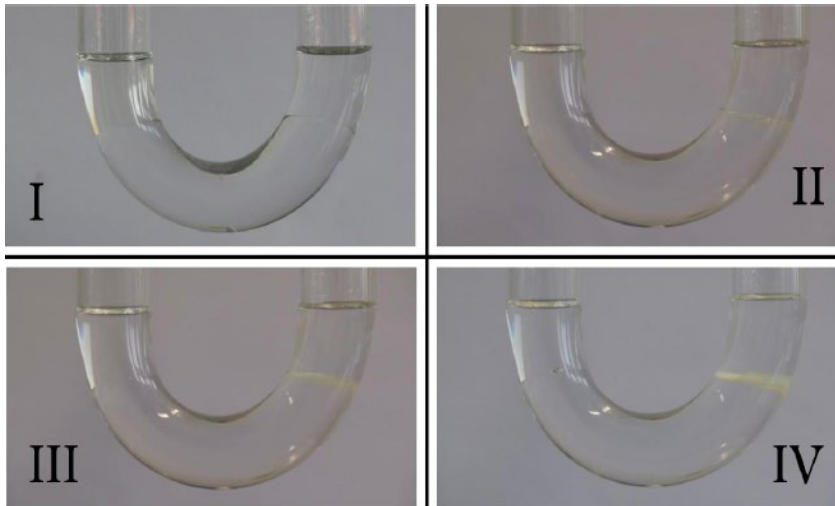
*Geräte und Chemikalien:*



Wie in Versuch 1, zusätzlich Kaliumiodid-Lösung,  $0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , Silbernitrat-Lösung,  $0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (Brandfördernd, Ätzend, Umweltgefährdend)

*Durchführung:*

Die Durchführung erfolgt exakt so wie in Versuch 1 beschrieben. Allerdings werden in den linken Schenkel 5 mL der KI-Lösung eingipettiert und in den rechten Schenke zu der wässrigen Phase einige Tropfen Silbernitrat-Lösung hinzugegeben.



**Abb. 8:** Transport von Kaliumiodid durch Dichlormethan nach Zugabe von [18]-Krone-6-Lösung. Die Bilder wurden (I) 1 Sekunde, (II) 2 Minute, (III) 10 Minuten und (IV) 30 Minuten nach Zugabe des Ethers aufgenommen.

*Beobachtung und Auswertung:*

In den drei klaren, farblosen Flüssigkeitsphasen lässt sich zunächst keine Veränderung beobachten. Nach ca. 2 min aber ist im rechten Schenkel an der Phasengrenzfläche eine gelbliche Trübung zu beobachten, die sich im weiteren Verlauf des Versuchs zunehmend verstärkt. Ganz offensichtlich kann auch hier der Kronenether als Modellcarrier die Kalium-Ionen und aus bereits beschriebenen Gründen der Elektroneutralität unsolvatisierte Iodid-Ionen durch die unpolare Dichlormethanphase transportieren. An der Grenzfläche Dichlormethan/Wasser im rechten Schenkel können die Iodid-Ionen durch Silbernitrat als Silberiodid nachgewiesen werden.

#### **4. Selektivität des Ionentransports durch Kronenether**

Wie bereits oben erläutern wurde, handelt es sich bei Kronenether um cyclische Polygoether mit variabler Ringgröße. Die Eigenschaft, aufgrund freier Elektronenpaare am Sauerstoff-Atom Kationen zu komplexieren, ist bei den Kronenethern besonders stark ausgeprägt, da hier mehrere Ether-Sauerstoff-Atome in maßgeschneiderter, cyclischer Anordnung um ein zentrales Kation herum

angeordnet sind. Die Komplexe von Kronenethern weisen daher eine recht hohe Stabilität auf. Die Kationenselektivität von Kronenethern wird im Wesentlichen von der Ringgröße bestimmt. Die Tabelle 1 zeigt den Durchmesser einiger Alkali-Ionen sowie den der Hohlräume einiger Kronenether-

| Kation          | Ionen-Durchmesser [Å] | Kronenether | Durchmesser des Hohlraums [Å] |
|-----------------|-----------------------|-------------|-------------------------------|
| Li <sup>+</sup> | 1.36                  | [14]Krone-4 | 1.2- 1.5                      |
| Na <sup>+</sup> | 1.94                  | [15]Krone-5 | 1.7- 2.2                      |
| K <sup>+</sup>  | 2.66                  | [18]Krone-6 | 2.6- 3.2                      |

Tab. 1: Durchmesser einiger Alkali-Ionen sowie Hohlraumdurchmesser einiger Kronenether

Vergleicht man die Ionenradien mit den Hohlraumradien der Kronenether wird deutlich, dass der Transport eines Kations dann besonders gut verläuft, wenn das Kation möglichst passgenau in den Hohlraum des Ethers eingelagert werden kann. Das bedeutet z. B., dass Kalium-Ionen durch [18]Krone-6 besser durch eine unpolare Phase transportiert werden können als Natrium-Ionen oder dass Kalium-Ionen durch [15]Krone-5 langsamer und damit schlechter transportiert werden können als durch den [18]Krone-6. Diese Selektivität des Ionentransports kann experimentell leicht gezeigt werden.

#### Versuch 4: Substratspezifität der Kronenether

##### *Geräte und Chemikalien:*

3 U-Rohre, 3 Messpipetten (5 mL), Vollpipette (20 mL), 2 mL Spritze mit 12 cm langen Kanüle, Magnetrührer, kleiner Rührfisch, Stoppuhr, Kronenether ([18]-Krone-6-Ether)-Lösung (0,4 mol · L<sup>-1</sup> in CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, Gesundheitsgefährdend), Kronenether ([15]-Krone-5-Ether)-Lösung (0,4 mol · L<sup>-1</sup> in CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, Gesundheitsgefährdend) Dichlormethan (Gesundheitsgefährdend), Kaliumpermanganat-Lösung, 0,1 mol · L<sup>-1</sup> (Gesundheitsgefährdend), Natriumpermanganat-Lösung, 0,1 mol · L<sup>-1</sup> (Brandfördernd, Ätzend), dest. Wasser

##### *Durchführung:*

Die Durchführung erfolgt analog der Beschreibung in Versuch 1. Es werden drei U-Rohre mit 20 mL Dichlormethan gefüllt und in den rechten Schenkel jeweils 5 mL Wasser einpipettiert. Das erste U-Rohr (a) wird im linken Schenkel mit 5 mL Kaliumpermanganat-Lösung, das zweite U-Rohr (b) im linken Schenkel mit 5 mL Natriumpermanganat-Lösung befüllt. In diese beiden U-Rohre wird nun mit der Spritze vorsichtig (!) jeweils 1 mL der [18]-Krone-6-Ether-Lösung durch die wässrige Phase

des rechten Schenkels in die Dichlormethanphase gegeben. Die Stoppuhr wird gestartet.

In den linken Schenkel des dritten U-Rohrs (c) werden ebenfalls 5 mL Kaliumpermanganat-Lösung, in den rechten Schenkel 5 mL Wasser einpipettiert. Mit der Spritze wird nun 1 mL der [15]-Krone-5-Ether-Lösung durch die wässrige Phase des rechten Schenkels in die Dichlormethanphase gegeben, die Stoppuhr wird gestartet.

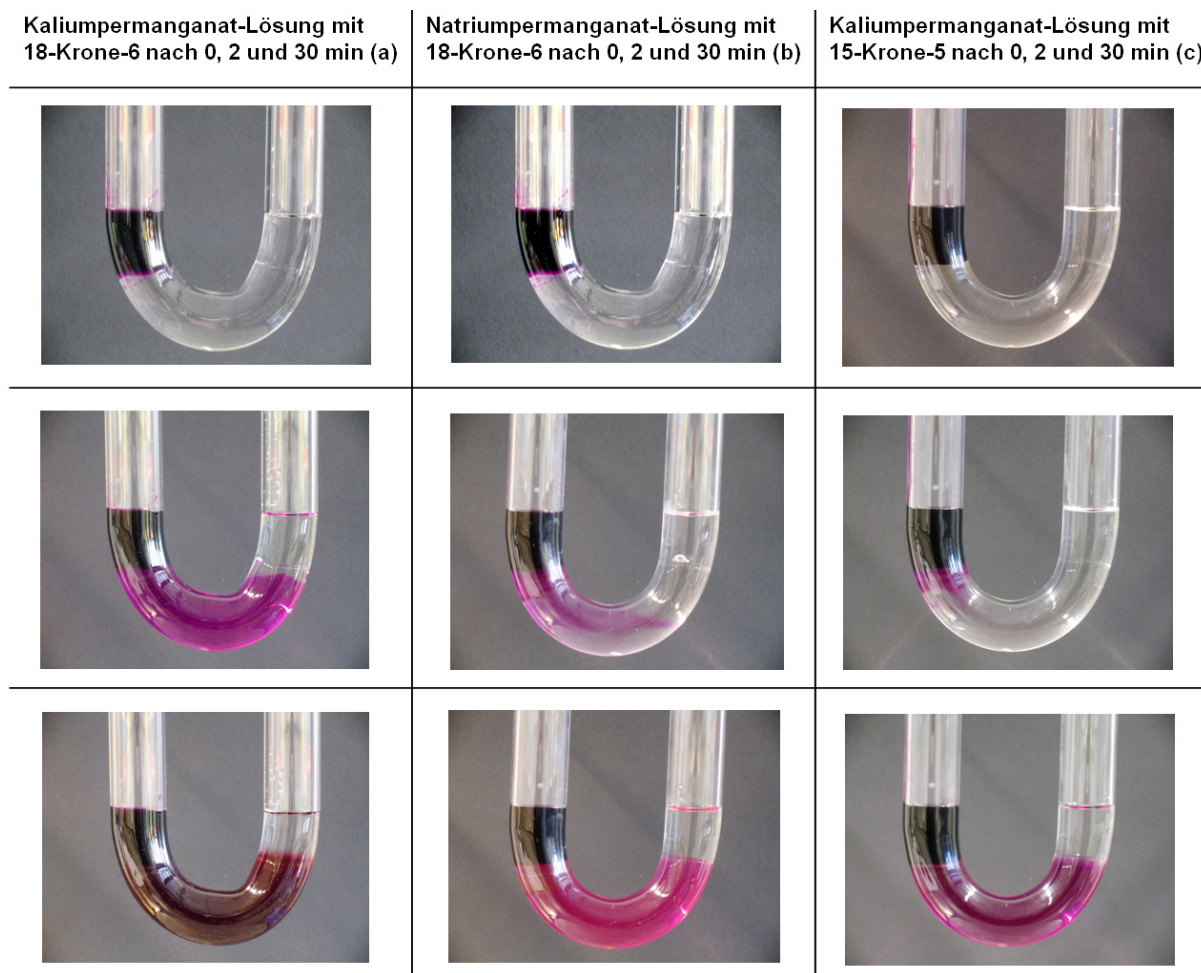


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf des Ionentransports von Kalium- und Natriumpermanganat durch [18]-Krone-6 resp. [15]-Krone-5-Ether

In der Abbildung 9 ist ersichtlich, dass der Ionentransport von Kaliumpermanganat durch den [18]-Krone-6-Ether (a) im zeitlichen Verlauf wesentlich schneller erfolgt als beim Transport von Natriumpermanganat (b). So ist nach bereits 2 min im Ansatz (a) eine deutliche und kontinuierliche Verfärbung der organischen Phase beobachtbar, nach ca. 30 min erfolgt der Durchtritt in die wässrige Phase. In Ansatz (b) dagegen ist eine deutlich geringere Färbung sichtbar, ein Durchtritt in die wässrige Phase erfolgt auch nach mehr als 60 min nicht. Diese Beobachtung korrespondiert mit den in Tabelle 1 dargestellten Durchmessern der Ionen und des Innendurchmessers des

Kronenethers [18]-Krone-6 (Na-Ion: 194 pm, K-Ion: 266 pm, [18]-Krone-6: 260-320 pm). Die Kalium-Ionen können also wesentlich passgenauer in dem Hohlraum komplexiert werden durch wesentlich besser durch die unpolare Phase transportiert werden als die Natrium-Ionen.

Im Ansatz (c) ist der Kronenether 15-Krone-5 (170- 220 pm) als Transportmittel eingesetzt worden. Vergleicht man nun diesen Ansatz mit dem Ansatz (a) zeigt sich, dass hier der Transport der Ionen offensichtlich nicht so schnell erfolgt. Auch hier ist der Grund der Hohlraumdurchmesser des Kronenethers für den die Kalium-Ionen mit einem Ionendurchmesser von 266 pm zu groß sind, so dass pro Zeiteinheit wesentlich weniger Kalium-Ionen durch die unpolare Phase transportiert werden können.

#### **4 Zusammenfassung**

Mit den in diesem Beitrag beschriebenen Experimenten zum Ionendurchtritt aus einer wässrigen Phase in eine unpolare Phase sowie dem Transport der Ionen durch eine unpolare Phase mit Hilfe von Kronenethern stehen den Schülern Modellexperimente zur Verfügung, mit denen sich der carriervermittelte Transport von Ionen vom extrazellulären Raum durch die Biomembran in das Innere der Zelle anschaulich darstellen lässt. Der besondere Reiz der vorgestellten Experimente liegt in der Farbigkeit des Ionentransports, wodurch der Transport durch die unpolare Phase sehr schön von den Schülern verfolgt werden kann. Gleichwohl sollte man aber neben der Phänomenebene auch immer die Visualisierung auf der Teilchenebene in den Unterricht integrieren, so dass die Schüler den Verlauf des Ionentransports durch den Kronenether auf der Diskontinuumsebene nachstellen können. Durch die experimentelle Erschließung der Selektivität des Ionentransports aufgrund der notwendigen Passgenauigkeit von Ionendurchmesser und Hohlraumdurchmesser des jeweiligen Kronenethers kann den Schülern die hochgradige Spezifität des Stofftransports durch die Biomembran verdeutlicht werden.

Will man zudem – wie in der Einleitung angesprochen – die Frage klären, wie bestimmte toxisch wirkende Stoffe in das Innere der Zelle gelangen können, hat man jetzt ein Modellexperiment zur Verfügung, mit dem sich der Eintritt von z. B. Cr(IV)-Verbindungen durch eine unpolare Phase (Biomembran) in eine wässrige Phase (Zellinnere) veranschaulichen lässt. Damit lassen sich neben den rein chemischen Aspekten (Redoxchemie, Phasentransferkatalyse, Polaritäten etc.) auch Themenfelder aus den naturwissenschaftlichen Nachbardisziplinen Biologie oder Biochemie (Membranaufbau, Stofftransport, Redoxchemie mit biologisch relevanten Reduktionsmitteln etc.) fachübergreifend erarbeiten.

## Literatur:

- [1] The Cognition and Technology Group at Vanderbilt, The Jasper Projekt: Lessons in Curriculum, Instruction, Assessment and Professionals Development. Lawrence Erlbaum Associates Inc., New York 1997
- [2] J. Friedrich, M. Oetken, Redoxchemie und Toxikologie von Chromverbindungen  
Eine experimentelle und fachübergreifende Unterrichtseinheit zur Redoxchemie und zur Toxikologie von Chromverbindungen im Rahmen des ChemCi-Projekts -  
inszeniert und illustriert mit Szenen aus dem Spielfilm „Erin Brockovich“. PdN-ChiS  
61, 8, S. 34-43 (2012)
- [3] F.Vögtle, Supramolekulare Chemie. Teubner Verlag, Stuttgart 1992
- [4] C.J. Pederson, Die Entdeckung der Kronenether (Nobel-Vortrag), Pedersen, Angew.  
Chem. 100, S. 1053-1059 (1988)
- [5] [www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_DE\\_CB7199194.htm](http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_DE_CB7199194.htm) (letzter  
Zugriff: 09.11.2012)
- [6] W. Monden, G. Kosmann, H. Heiner, Zur Permeation von Ionen durch  
Biomembranen. UB 4, 46, S. 40-46 (1980)