

Publikation von www.educeth.ch - dem Bildungsportal der ETH Zürich**Leitfähigkeit in der Chemie***von**Dr. Markus Schudel***Datum**

Publikation der Unterrichtseinheit auf EducETH am 10. Juli 2006

Inhalt

Die Studierenden sollen durch selbständig entworfene Experimente zum Thema "Elektrische Leitfähigkeit von Lösungen" einige grundlegende Erkenntnisse gewinnen. Alle nötigen Materialien für die Lehrkraft und für die Studierenden liegen dieser Unterrichtseinheit bei.

Entdeckungsmöglichkeiten

Die Schüler/innen entdecken die Reihenfolge der Leitfähigkeit der Elektrolyte.

Die Lernenden entdecken, dass die starken Säuren und Basen deutlich höhere Leitfähigkeiten besitzen als deren Salze.

Die Lernenden entwickeln eigene, Hypothesen z.B. für die sehr hohe Leitfähigkeit starker Säuren.

Die Lernenden entdecken, dass die H_3O^+ - und OH^- -Ionen den Strom am besten leiten.

Die Lernenden erkennen z.B. durch den Vergleich verschieden konzentrierter Salzlösungen, dass die spezifische Leitfähigkeit von der Konzentration des Elektrolyten abhängt.

Weitere Entdeckungsmöglichkeiten sind in der Arbeit aufgelistet.

Fachdidaktisches Review und Überarbeitung

Dr. Juraj Lipscher

Fachliches Review

Prof. Willem Koppenol

Rechtliches

Die vorliegende Unterrichtseinheit darf ohne Einschränkung heruntergeladen und für Unterrichtszwecke kostenlos verwendet werden. Dabei sind auch Änderungen und Anpassungen erlaubt. Der Hinweis auf die Herkunft der Materialien (ETH Zürich, EducETH) sowie die Angabe der Autorinnen und Autoren darf aber nicht entfernt werden.

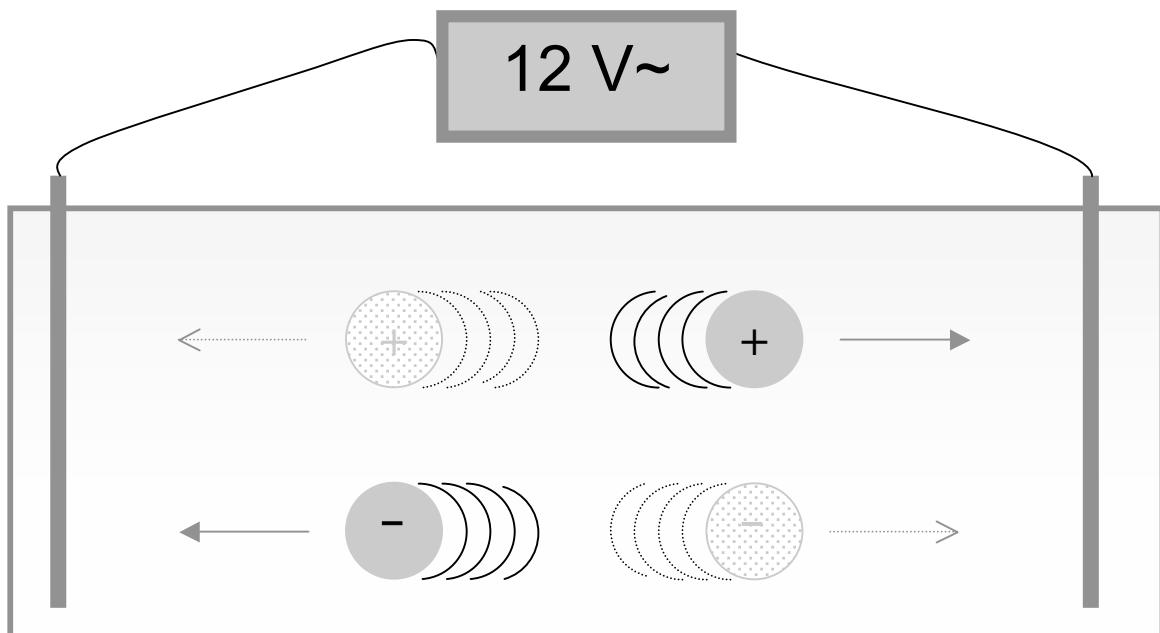
Weitere Informationen

Weitere Informationen zu dieser Unterrichtseinheit und zu EducETH finden Sie im Internet unter <http://www.educ.ethz.ch> oder unter <http://www.educeth.ch>.

ETH Zürich, Institut für Verhaltenswissenschaften
Departement Chemie

Gelenktes Entdeckendes Lernen zum Thema: Leitfähigkeit in der Chemie

Fach:	Chemie
Schultyp:	Gymnasium
Voraussetzung der Adressaten:	Ergänzungsfach Chemie oder Schwerpunktfach Chemie/Biologie (kurz vor der Matura)
Informationsangebot / Entdeckungsmöglichkeiten:	Leitfähigkeitsmessgerät, diverse Chemikalien, Materialien und Unterlagen.
Dauer der gesamten Unterrichtseinheit:	3 Lektionen
Dauer des selbständigen Entdeckens:	90 Minuten
Autor:	Dr. Markus Schudel
Betreuer:	Dr. Juraj Lipscher
Fassung:	Fassung: 26. September 2004 Letzte Aktualisierung: Juni 2006
Schulerprobung:	keine



Teil 1: Material für die Lernenden

A. Das Informationsangebot

A.1 Chemikalien, Geräte, Materialien und Unterlagen pro Lernenden

Die Lehrperson legt folgendes Material am *Arbeitsplatz eines jeden Lernenden* bereit:

Chemikalien:

- *folgende wässrige Salzlösungen in Flaschen ($V = 500 \text{ ml}$) gelöst und deutlich beschriftet:* Natriumchloridlösung ($c = 0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$), Kaliumchloridlösung ($c = 0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$), Natriumacetatlösung ($c = 0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$), Kaliumchloridlösung ($c = 0,100 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$);
- *folgende Säuren und Basen in Flaschen ($V = 500 \text{ ml}$) gelöst und deutlich beschriftet (Gefahrensymbol):* Salzsäure ($c = 0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$), Natronlauge ($c = 0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$), Essigsäure ($c = 0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$).

Geräte:

- Laborthermometer ($\theta = 0 \dots 100^\circ\text{C}$), Magnetrührer inkl. Heizplatte, mit diversen Rührfischen, Peleusball („Giftballon“)
- *selbstgebautes Leitfähigkeitsmessgerät zur Messung der spezifischen Leitfähigkeit κ in (mS/cm):* Stromversorgungsgerät¹ ($U = 9 \dots 24 \text{ V}$, $I_{\text{max}} = 600 \text{ mA}$, 50 Hz), zwei digitale Multimeter ($I = 0 \dots 25 \text{ mA}$, $U = 0 \dots 15 \text{ V}$), Schalter, Leitfähigkeitsmesszelle bestehend aus zwei Graphitelektroden (aus Flachbatterien gewonnen) mit Haltevorrichtung (Elektrodenabstand: ca. 3 cm) und mit gelber Markierung der Eintauchtiefe, Stativ mit Schraubklemmen (Befestigung Leitfähigkeitsmesszelle), diverse Kabel mit Krokodilklemmen, Zellkonstante C bereits bestimmt und auf einem Kleber auf der Leitfähigkeitsmesszelle klar sichtbar notiert (Schaltbild: siehe Bedienungsanleitung Seite 8).

Materialien:

- Schutzbrille, Labormantel, eine Packung Einweghandschuhe, pH-Universalindikator (flüssig), pH-Universalindikatorpapier, Spritzflasche gefüllt mit destilliertem Wasser, Bürette ($V = 25 \text{ ml}$) für Titrationsen, Stativ mit Schraubklemmen, wissenschaftlicher Taschenrechner, Lineal mit Millimereinteilung, mehrere A4-Blätter und mehrere A4-Seiten Millimeterpapier, wasserfeste Filzstifte in verschiedenen Farben, Schere, leere Chemikalienflaschen ($V = 250 \text{ ml}$);
- *diverse Glaswaren in genügender Anzahl:* Messkolben ($V = 100 \text{ ml}$), Becherglas ($V = 100 \text{ ml}$) mit gelber Markierung bei ca. 50 ml , Bechergläser ($V = 100 \text{ ml}$), Messzylinder ($V = 10 \text{ ml}$), Messzylinder ($V = 50 \text{ ml}$), Messpipetten ($V = 10 \text{ ml}$).

Unterlagen und Hilfsmittel:

Folgende Unterlagen liegen in Form von Arbeits- und Hilfsblättern am Arbeitsplatz des Lernenden bereit: Lenkung, Rechenhilfe, Liste Chemikalien etc., Sicherheitshinweise, Bedienungsanleitung, Tabellen und Vorlage A3-Blatt (siehe S. 4-18).

¹ z.B. Steckernetzgerät BE 300-50, Art.No. 920033 der Firma Distrelec AG, CH-8606 Nänikon. Kostenpunkt ca. Sfr. 37.-

A.2 Allgemein zugängliche Chemikalien, Geräte und Materialien

Folgende Chemikalien, Geräte und Materialien stehen in ausreichenden Mengen für die ganze Klasse zur Verfügung und sind *zentral* an einem allgemein zugänglichen Ort im Labor (z.B. Lehrerpult) gut sichtbar bereitgestellt:

Chemikalien:

- *folgende anorganische Salze (z.B. Fluka oder Merck, mit Gefahrensymbolen und Angaben der molaren Massen):* Lithiumchlorid, Natriumchlorid, Kaliumchlorid, Natriumbromid, Natriumiodid, Ammoniumchlorid, Natriumcarbonat, Magnesiumchlorid, Calciumchlorid, Magnesiumsulfat, Bariumchlorid, Silbernitrat, Silberchlorid, Silberiodid, Silberbromid;
- *folgende organische Salze (z.B. Fluka oder Merck, mit Gefahrensymbolen und Angaben der molaren Massen):* Natriumacetat, Natriumbenzoat, Tetramethylammoniumchlorid, Tetraethylammoniumchlorid, Tetrapropylammoniumchlorid;
- *folgende schwache Säuren und Basen bereits in Flaschen ($V = 500 \text{ ml}$) gelöst und deutlich beschriftet (Gefahrensymbol):* Ammoniaklösung ($c = 0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$), Zitronensäurelösung ($c = 0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$), Ameisensäurelösung ($c = 0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$).

Geräte:

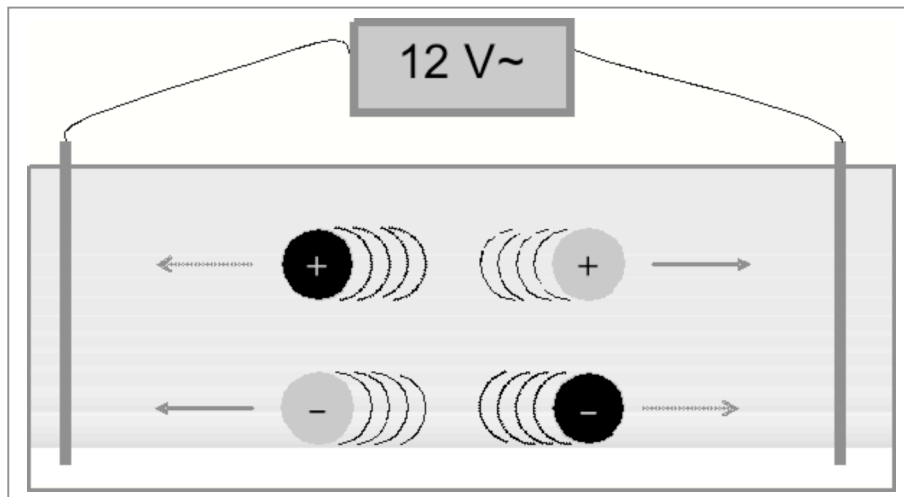
- *mehrere einfache Leitfähigkeitsdetektoren zur qualitativen Bestimmung der Leitfähigkeit:* bestehend aus einer Flachbatterie (4,5 V), einer Glühbirne und diversen Kabeln mit Krokodilklemmen (alles zusammengebaut und einsatzbereit).

Materialien:

- *diverse Küchen- und Haushaltsprodukte in beschrifteten Flaschen oder Originalverpackung:* destilliertes Wasser (für Bügeleisen), Leitungswasser, Mineralwasser, Waschmittelpulver, Küchenwürze (z.B. Maggi, Knorr), Zucker, Kochsalz, Stärkepulver;
- *diverse Materialien frei zugänglich:* Glaswaren und Laborutensilien (in Regalen und Laborschränken), genügende Anzahl von Waagen (Ablesbarkeit 1,0 mg), Entsorgungskanister für Schwermetalle (Silbersalze), destilliertes Wasser (mehrere Vorratsgefäße);
- *Periodensystem der Elemente:* mit Angaben der molaren Massen der Elemente, hängt gut sichtbar (Format einer Wandkarte) für alle Lernenden vorne über dem Lehrerpult;
- weitere A4-Blätter, A4-Seiten Millimeterpapier, A3-Blätter;
- mindestens vier grosse Pinwände im Labor verteilt für die nachfolgende „Ausstellung der Resultate“ der Lernenden (A3-Blätter).

0

LEITFÄHIGKEIT IN DER CHEMIE



INHALTSVERZEICHNIS

L	LENKUNG:	Leitfähigkeit in der Chemie
1	RECHENHILFE:	Spezifische Leitfähigkeit κ
2	LISTE:	Chemikalien, Materialien, etc.
3	SICHERHEITSHINWEIS:	Achtung auf Augen und Haut!
4	BEDIENUNGSANLEITUNG:	Leitfähigkeitsmessgerät
5	TABELLE:	Ionenradien mit Hydrathüllen
6	TABELLE:	Säure/Base-Reihe
7	TABELLE:	Löslichkeit verschiedener Salze
8	VORLAGE:	A3-Blatt für die Pinwand

1

RECHENHILFE: Spezifische Leitfähigkeit κ **Wozu brauche ich diese Rechenhilfe?**

Sie kennen den Begriff „spezifische Leitfähigkeit“ bereits. Wir haben ihn in den vorangegangenen Stunden bereits besprochen und mehrmals angewendet. Dabei haben Sie auch geübt, wie man aus den Messgrößen „elektrische Stromstärke“ und „elektrische Spannung“ den **elektrischen Widerstand** und daraus die **spezifische Leitfähigkeit** einer Salzlösung berechnet. Als Hilfe wiederhole ich es für Sie nochmals. *Falls Sie da sattelfest sind, brauchen Sie hier nicht weiter zu lesen!*

Wie rechne ich den Widerstand R aus?

Sie dividieren die gemessene **Spannung U** in „Volt“ durch die gemessene **Stromstärke I** in „Ampere“. So erhalten Sie den elektrischen **Widerstand R** in „Volt pro Ampere“. Die Einheit „Volt pro Ampere“ nennen wir *Ohm* (Ω).

$$\text{Widerstand } R \text{ in } (\Omega) = \frac{\text{Spannung } U \text{ in (V)}}{\text{Stromstärke } I \text{ in (A)}}$$

→ *Beispiel:* $U = 10,5 \text{ V}$ dividiert durch $I = 0,15 \text{ A}$ (=150 mA) ergibt einen **Widerstand** von $R = 70 \Omega$.

Wie rechne ich die spezifische Leitfähigkeit κ einer Salzlösung aus?

Sie können die **spezifische Leitfähigkeit κ** (sprich „kappa“) aus dem vorher bestimmten **Widerstand R** berechnen. Dazu benötigen Sie noch die **Zellkonstante C** .

$$\text{Spezifische Leitfähigkeit } \kappa \text{ in (S/cm)} = \frac{\text{Zellkonstante } C \text{ in (cm}^{-1}\text{)}}{\text{Widerstand } R \text{ in } (\Omega)}$$

Die **Einheit** der **spezifischen Leitfähigkeit κ** ist (S/cm), sprich „Siemens pro Zentimeter“. Ein *Siemens* (1 S) ist der *Kehrwert* von einem *Ohm* (1 Ω).

Der Wert für die **Zellkonstante C** hängt vom **Abstand** und der **Länge** (Eintauchtiefe) der Elektroden ab. Die **Einheit** für die Zellkonstante haben wir in den vergangenen Stunden in (cm^{-1}), sprich „1 pro Zentimeter“, angegeben. Verwenden Sie diese Einheit auch hier.

→ *Beispiel:* Zellkonstante $C = 12,1 \text{ cm}^{-1}$ dividiert durch Widerstand $R = 1038 \Omega$ ergibt eine **spezifische Leitfähigkeit** von $\kappa = 0,0117 \text{ S/cm}$ oder $11,7 \text{ mS/cm}$.

2**LISTE: Chemikalien, Materialien und Geräte*****Welche Chemikalien stehen auf meinem Labortisch?*****Diverse Salzlösungen**

Bereits gelöst in Flaschen (500 ml):

- $0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ **Natriumchloridlösung,**
- $0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ **Kaliumchloridlösung,**
- $0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ **Natriumacetatlösung,**
- $0,100 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ **Kaliumchloridlösung.**

Diverse verdünnte Säuren und Basen

Bereits vorgelöst in Flaschen (500 ml):

- $0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ **Salzsäure,**
- $0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ **Natronlauge,**
- $0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ **Essigsäure.**

Welche Materialien und Geräte liegen auf meinem Labortisch?**Materialien**

- Schutzbrille, Labormantel, Einweghandschuhe;
- Spritzflasche gefüllt mit destilliertem Wasser;
- pH-Universalindikatorlösung, pH-Universalindikatorpapier;
- Lineal mit Millimeteerteilung, wissenschaftlicher Taschenrechner, mehrere A4-Blätter, mehrere A4-Seiten Millimeterpapier, wasserfeste Filzstifte in verschiedenen Farben, Schere, leere Chemikalienflaschen (250 ml), Stativ mit Schraubklemmen, Bürette (25 ml) für Titrationsen;
- Periodensystem der Elemente (hängt über dem Lehrerpult);
- *diverse Glaswaren:* Messkolben (100 ml), Becherglas (100 ml) mit gelber Markierung bei ca. 50 ml, Bechergläser (100 ml), Messzylinder (10 ml), Messzylinder (50 ml), Messpipetten (10 ml).

Geräte

- Magnetrührer mit Heizplatte, dazu diverse Rührfische, Giftballon (Peleusball), Laborthermometer ($0 \dots 100^\circ\text{C}$);
- selbstgebautes **Leitfähigkeitsmessgerät** zur Messung der **spezifischen Leitfähigkeit** κ in (mS/cm), bereits zusammengebaut und startbereit (siehe Bedienungsanleitung).

3**SICHERHEITSHINWEIS: Achtung auf Augen und Haut!**

Im Allgemeinen sind die hier verwendeten Chemikalien und Arbeitsschritte für Sie ungefährlich, solange Sie sich an

- **Es gelten die Ihnen bereits bekannten Sicherheitsvorschriften für das Arbeiten im chemischen Labor!**
- Tragen Sie während der **ganzen Zeit im Labor** eine **Schutzbrille!** Sie arbeiten unter anderem mit stark ätzenden Säuren und Basen!
- Tragen Sie den **Labormantel zugeknöpft**. Er bietet Ihrer **Haut** und Ihren **Kleidern** ausreichend Schutz vor Chemikalienspritzern.
- Tragen Sie **Schutzhandschuhe**, wenn Sie mit giftigen oder ätzenden Stoffen hantieren!
- Alle Chemikalien sind mit den üblichen **Gefahrensymbolen** (d.h. Symbole für giftige Stoffe) versehen. Sie kennen die Bedeutung dieser Gefahrensymbole und wissen, wie Sie sich am besten schützen können. Sie müssen diese **genau beachten!**
- Sie dürfen die **Chemikalien nicht** mit den Fingern **anfassen!** Bei versehentlichem Hautkontakt müssen Sie die betroffenen Körperstellen **sogleich** und **intensiv** mit sauberem Wasser abwaschen. *Im Zweifelsfall sagen Sie mir sofort Bescheid!*
- **Erhitzen Sie auf keinen Fall** folgende Stoffe in fester Form: **Tetramethylammoniumchlorid, Tetraethylammoniumchlorid, Tetrapropylammoniumchlorid**. Es können **giftige Dämpfe** entstehen! Auch für andere Stoffe wie Säuren, Basen oder Salze ist das Erhitzen in fester oder flüssiger Form über 60°C nicht ratsam (bei Flüssigkeiten: Siedeverzug und Chemikalienspritzer)!

Leitfähigkeitsmessgerät

- Wenn nicht gemessen wird: **Schalter** immer auf **AUS!**
- Wenn Schalter auf EIN:
 - ➔ **Nie** beide **Graphitelektroden gleichzeitig** anfassen!
 - ➔ **Nie** mit **elektrisch leitenden Gegenständen** (Spatel) Elektroden berühren!
 - ➔ **Nie** während der Leitfähigkeitsmessung mit einem **Metallspatel oder anderen Metallgegenständen** in einer Salzlösung **rühren** (Stromschlag, Kurzschluss)!
 - ➔ **Keine Lösungen mit einer Konzentration höher als 1 mol·l⁻¹ messen** (Kurzschlussgefahr).

4

BEDIENUNGSANLEITUNG: Leitfähigkeitsmessgerät

Sie haben das zusammengebaute **Leitfähigkeitsmessgerät** zur Messung der **spezifischen Leitfähigkeit κ** in (mS/cm) vor sich. Es besteht aus folgenden Teilen:

- Stromversorgungsgerät (Wechselstrom);
- zwei digitale Multimeter für die Messung der Wechselstromstärke (A~) und der Wechselspannung (V~);
- Leitfähigkeitsmesszelle bestehend aus zwei Graphitelektroden mit Haltevorrichtung (konstanter Elektrodenabstand) und mit Markierung der Eintauchtiefe;
- Stativ mit Schraubklemmen (Befestigung Leitfähigkeitsmesszelle);
- diverse farbige Kabel mit Krokodilklemmen.

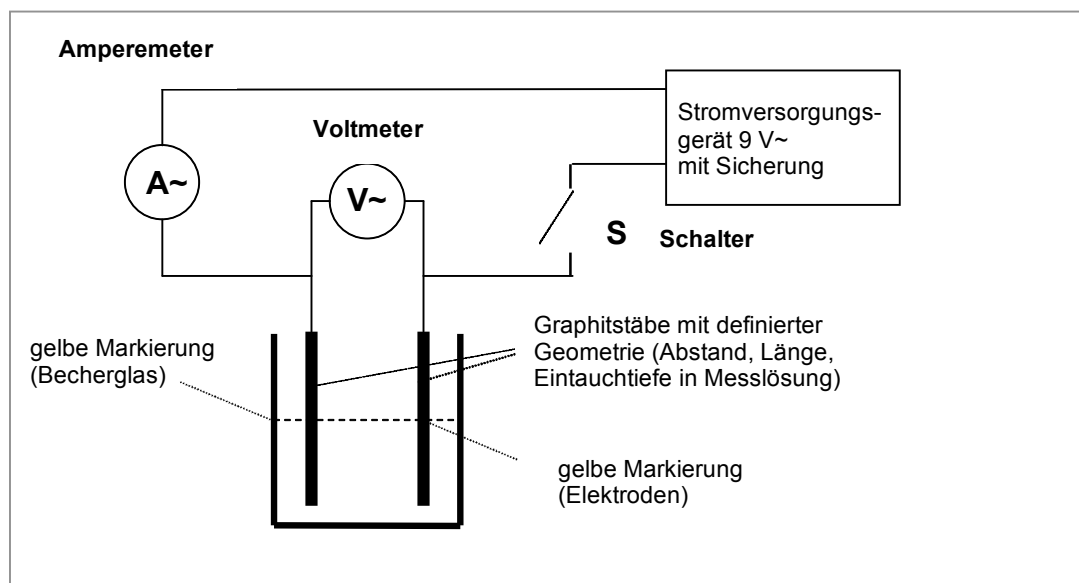


Abbildung 1. Schaltbild des Leitfähigkeitsmessgerätes.

→ Bitte beachten Sie die **gelbe Markierung** an den Elektroden, die Ihnen die **Eintauchtiefe** in die wässrige Lösung angibt.

Die Zellkonstante C

Der Wert für die **Zellkonstante C** Ihrer **Leitfähigkeitsmesszelle** steht auf Ihrem Leitfähigkeitsmessgerät. Dieser gilt für die Messung aller Lösungen bei **20°C**.

So bestimmen Sie die spezifische Leitfähigkeit κ einer wässrigen Lösung:

1. Bevor Sie mit der Messung starten, können Sie eine Tabelle für die Messwerte in Ihrem Laborjournal vorbereiten.
2. Das **Leitfähigkeitsmessgerät** ist **ausgeschaltet** (Schalter S auf „AUS“). Die beiden digitalen Multimeter bleiben **eingeschaltet** und zeigen jeweils die **Spannung** in **0,00 V** und die **Stromstärke** in **0,00 mA** an.

3. Geben Sie etwa 50 ml der zu messenden Lösung in das **gelb markierte Becherglas** (100 ml) und füllen Sie dieses **bis zur Markierung** auf (gelbe Markierung am Becherglas bei etwa 50 ml).
 4. Spülen Sie die Graphitelektroden mit **destilliertem Wasser** in einem *separaten* Becherglas ab.
 5. Tauchen Sie die Graphitelektroden mit *vorgegebenem Elektrodenabstand* (Halterung ca. 3 cm) in die Messlösung bis zur **markierten Eintauchtiefe an den Elektroden** ein.
 6. Schalten Sie nun das Leitfähigkeitsmessgerät ein (*Schalter S auf „EIN“*). Die Multimeter zeigen nun die gemessene **Spannung** und **Stromstärke** an. Lesen Sie diese Werte ab und tragen Sie diese in Ihre Tabelle im Laborjournal ein.
 7. Stellen Sie **sofort** das **Leitfähigkeitsmessgerät** ab, wenn Sie mit der Messung fertig sind (*Schalter S auf „AUS“*). Somit erhitzen sich die Messlösung und das Stromversorgungsgerät nicht unnötig. Die Multimeter bleiben eingeschaltet. *Achtung: die Leitfähigkeitsmessung sollte nicht länger als eine halbe Minute dauern.*
 8. Danach nehmen Sie die Elektroden aus der Messlösung heraus und spülen Sie diese wieder **mehrmals** mit **destilliertem Wasser** in einem *separaten* Becherglas ab.
 9. Sie können die gemessene Lösung in einem entsprechenden Vorratsgefäß (Becherglas) für die nachträgliche Entsorgung sammeln.
 10. Sie können die Graphitelektroden bis zur nächsten Messung in sauberem destilliertem Wasser stehen lassen.
- ➔ Bitte beachten Sie, dass während der Messung weder die **Eintauchtiefe** noch die **Abstände der Elektroden** verändert werden sollten.

Berechnung des Widerstandes R und der spezifischen Leitfähigkeit κ

Nun können Sie anhand der gemessenen **Spannung U in (V)** und **Stromstärke I (mA)** den **Widerstand R** berechnen:

$$R = U/I.$$

Die **spezifische Leitfähigkeit κ in (mS/cm)** können Sie aus dem bestimmten **Widerstand R** und der gegebenen **Zellkonstante C** berechnen:

$$\kappa = C/R.$$

Beispiel:

Gegeben: Zellkonstante $C = 12,1 \text{ cm}^{-1}$

Gemessen: Spannung $U = 10,0 \text{ V}$, Stromstärke $I = 6,3 \text{ mA}$

Gesucht: **spezifische Leitfähigkeit κ in mS/cm**

Lösung: $R = U/I = 10,0 \text{ V} / 0,0063 \text{ A} = \underline{1587 \Omega}$

$\kappa = C/R = 12,1 \text{ cm}^{-1} / 1587 \Omega = 0,0076 \text{ S/cm} = \underline{7,6 \text{ mS/cm}}$

5

TABELLE: Ionenradien mit Hydrathülle

Ionenart	Ladung	Ionenradius mit Hydrathülle (pm)	Ionenart	Ladung	Ionenradius mit Hydrathülle (pm)
Kationen			Anionen		
H ⁺ (H ₃ O ⁺)	+	450	OH ⁻	-	175
Li ⁺	+	300	F ⁻	-	175
Na ⁺	+	200	Cl ⁻	-	150
K ⁺	+	150	Br ⁻	-	150
NH ₄ ⁺	+	125	I ⁻	-	150
Ag ⁺	+	125	NO ₃ ⁻	-	150
Mg ²⁺	2+	400	CO ₃ ²⁻	--	225
Ca ²⁺	2 +	300	SO ₄ ²⁻	--	200
Ba ²⁺	2 +	250			
N(CH ₃) ₄ ⁺	+	225	HCOO ⁻	-	175
N(C ₂ H ₅) ₄ ⁺	+	300	CH ₃ COO ⁻	-	225
N(C ₃ H ₇) ₄ ⁺	+	400	C ₆ H ₅ COO ⁻	-	300

Ionenradius mit Hydrathülle

Der Ionenradius mit Hydrathülle ist als derjenige Radius definiert, den ein gelöstes Ion in Wasser einnimmt. Eine mehr oder weniger dichte Hülle aus Wassermolekülen lagert sich um das ‚nackte‘ Ion an. Diese Hülle wird Hydrathülle genannt.

Der ‚nackte‘ Ionenradius ist als derjenige Radius definiert, den ein Ion als starre Kugel gedacht in einem Ionengitter besitzt.

Die Werte für die Ionenradien mit Hydrathülle sind gemittelte Werte. Sie basieren auf **verschiedenen Messungen** aus der Literatur. Je nach Experiment kann dieser Wert um **± 50 pm** schwanken.

(Kielland 1937, 1677)

Wie Sie vielleicht bemerkt haben, nimmt der Radius der hydratisierten Ionen von Li^+ bis K^+ in der Reihenfolge Li^+ (300 pm) > Na^+ (200 pm) > K^+ (150 pm) ab.

Dies entspricht dem umgekehrten Trend, den Sie aus dem Chemieunterricht für die „nackten“ Ionenradien kennen. Dort nimmt der Ionenradius in der Reihenfolge Li^+ (60 pm) < Na^+ (95 pm) < K^+ (133 pm) zu.

Der Grund für diesen Unterschied liegt darin, dass die Ionen in Wasser hydratisiert werden. Da das Li^+ -Ion aber so klein ist (60 pm), besitzt es eine vergleichsweise höhere Ladungsdichte (Ladung pro Volumen) als beispielsweise das K^+ -Ion. Aufgrund dieser höheren Ladungsdichte lagern sich an das Li^+ -Ion im Vergleich zum K^+ -Ion besonders viele Wassermoleküle an.

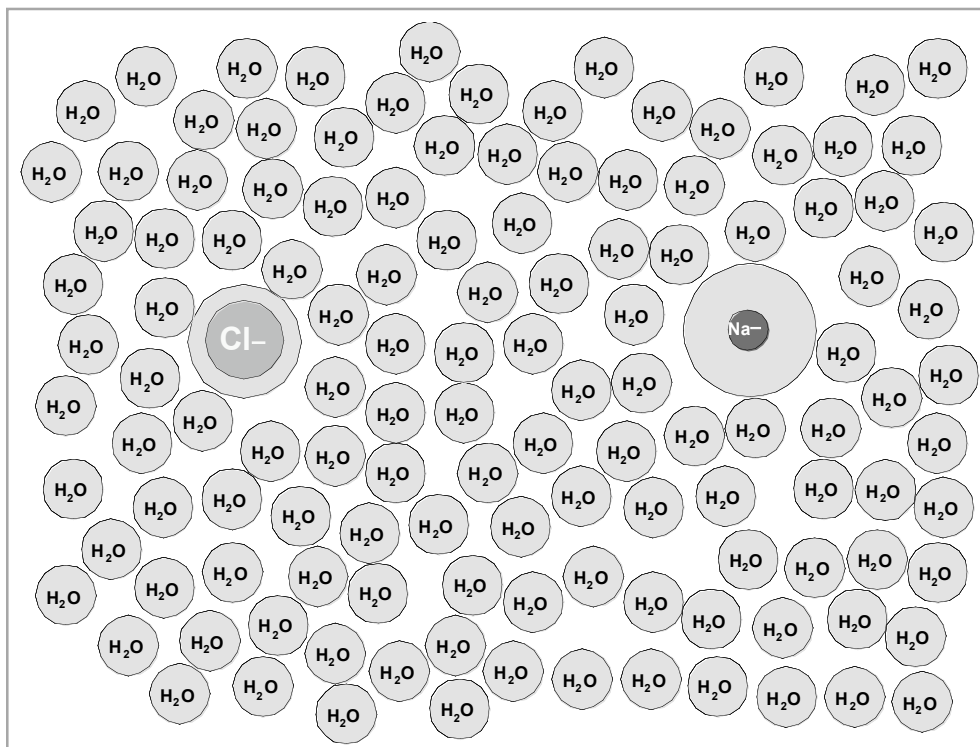


Abbildung 2. Natriumchlorid gelöst in Wasser. Na^+ - und Cl^- -Ionen sind in Wasser von einer Hydrathülle umgeben.

6

TABELLE: Säure/Base-Reihe

Säure		pK _s (25°C)	Base	
HClO ₄	Perchlorsäure	- 9	ClO ₄ ⁻	Perchlorat-Ion
HCl	Chlorwasserstoff	- 6	Cl ⁻	Chlorid-Ion
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure	- 3	HSO ₄ ⁻	Hydrosulfat-Ion
H ₃ O ⁺	Hydroxonium-Ion	- 1,74	H ₂ O	Wasser
HNO ₃	Salpetersäure	- 1,32	NO ₃ ⁻	Nitrat-Ion
HOCCOOH	Oxalsäure	1,46	HOCCOO ⁻	Hydrogenoxalat-Ion
HSO ₄ ⁻	Hydrosulfat-Ion	1,92	SO ₄ ⁻	Sulfat-Ion
H ₃ PO ₄	Phosphorsäure	1,96	H ₂ PO ₄ ⁻	Dihydrogenphosphat-Ion
HF	Fluorwasserstoff	3,14	F ⁻	Fluorid-Ion
HCOOH	Ameisensäure	3,7	HCOO ⁻	Formiat-Ion
C ₆ H ₅ COOH	Benzoessäure	4,22	C ₆ H ₅ COO ⁻	Benzoat-Ion
HOCCOO ⁻	Hydrogenoxalat-Ion	4,40	⁻ OCCOO ⁻	Oxalat-Ion
CH ₃ COOH	Essigsäure	4,76	CH ₃ COO ⁻	Acetat-Ion
H ₂ CO ₃	Kohlensäure	6,46	HCO ₃ ⁻	Hydrogencarbonat-Ion
H ₂ PO ₄ ⁻	Dihydrogenphosphat-Ion	7,21	HPO ₄ ²⁻	Hydrogenphosphat-Ion
NH ₄ ⁺	Ammonium-Ion	9,21	NH ₃	Ammoniak
HCO ₃ ⁻	Hydrogencarbonat-Ion	10,40	CO ₃ ²⁻	Carbonat-Ion
HPO ₄ ²⁻	Hydrogenphosphat-Ion	12,32	PO ₄ ³⁻	Phosphat-Ion
H ₂ O	Wasser	15,74	OH ⁻	Hydroxid-Ion

Anhand dieser Tabelle können folgende Fragen beantwortet werden:

Frage:

Wie gross ist die H₃O⁺-Konzentration einer **0,10 molaren Salzsäure** (starke Säure: pK_s = - 6)?

Antwort: Die H₃O⁺-Konzentration ist mit c(H₃O⁺) ≈ 0,1 mol/L **so gross** wie die **Konzentration der Salzsäure**.

Frage:

Wie gross ist die H₃O⁺-Konzentration einer **0,10 molaren Essigsäure** (schwache Säure: pK_s = 4,76)?

Antwort: Die H₃O⁺-Konzentration ist mit c(H₃O⁺) ≈ 0,0013 mol/L **um Grössenordnungen kleiner** als die **Konzentration der Essigsäure**.

(Christen 1984, 562-563)

7

TABELLE: Löslichkeit verschiedener Salze

Salze	Formel	Löslichkeit bei 20°C in g pro 100 g Wasser
Bariumchlorid	BaCl ₂	35,7
Calciumchlorid	CaCl ₂	74,5
Natriumcarbonat	Na ₂ CO ₃	21,6
Natriumsulfat	Na ₂ SO ₄	19,4
Bariumsulfat	BaSO ₄	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Bariumcarbonat	BaCO ₃	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Calciumsulfat	CaSO ₄	0,20
Calciumcarbonat	CaCO ₃	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Silberchlorid	AgCl	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Silberbromid	AgBr	$1,4 \cdot 10^{-5}$
Silberiodid	AgI	$3,0 \cdot 10^{-7}$

(Herrler 1976, 95)

8**VORLAGE: A3-Blatt für die Pinwand****TITEL**

Vorname und Name

Datum

**TABELLE, GRAPHIK, SKIZZE,
z.B. mit Messresultaten, etc.****TEXT (in Stichworten)****z.B. Entdeckungen, Widersprüche**

- ...
- ...
- ...

Tip: Schreiben Sie gut leserlich von Hand und halten Sie sich kurz!

B. Lenkung

L

LENKUNG:

Leitfähigkeit in der Chemie

Worum geht es?

Sie werden während der folgenden **drei Praktikumslektionen** die Leitfähigkeiten verschiedener Lösungen **messen** und einiges dazu **selbständig entdecken** können.

Warum diese drei Praktikumslektionen?

Sie haben in den vergangenen Stunden viel über die *Chemie des Wassers* gelernt. Sie wissen, dass wässrige Lösungen unter bestimmten Umständen den **elektrischen Strom leiten** können. Sie haben dazu in den letzten Stunden interessante Experimente gesehen. Sie kennen den berühmten **Glühbirnentest** sowie die **Wanderung von MnO_4^- -Ionen** im **elektrischen Feld**.

Sie haben ebenfalls in der letzten Laborstunde gelernt, was ein **Leitfähigkeitsmessgerät** ist und wie man dieses zur Bestimmung der **spezifischen Leitfähigkeit** einer wässrigen **Salzlösung** benutzt. Sie haben dabei zu zweit die spezifische Leitfähigkeit einer **$0,100 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ KCl-Lösung** bestimmt. Scheinbar eine einfache Angelegenheit!

*Doch das ist noch lange nicht alles! Es gibt zu diesem Thema noch sehr viel mehr zu entdecken! Sie werden im Verlauf der heutigen **drei Praktikumslektionen** insgesamt **90 Minuten** Zeit für eigene Entdeckungen haben.*

Übersicht über die drei Praktikumslektionen

- Sie arbeiten während der **ersten 90 Minuten selbständig**. Sie studieren zuerst ca. **30 Minuten** die Unterlagen auf Ihrem Arbeitsplatz. Sie führen danach während der **restlichen 60 Minuten** verschiedene Experimente ganz nach Ihrem Gutdünken durch. Sie arbeiten **ohne Pause** durch. Während der ganzen Zeit beantworte ich **keine** Fragen zum Stoff und werde nicht in Ihr selbständiges Arbeiten eingreifen.
- Danach haben Sie **20 Minuten** Zeit, **allein** ein **A3-Blatt** mit Ihren **Resultaten** zu gestalten. Dieses Blatt hängen Sie dann an eine der vier **Pinwände** im Labor aus.
- Als **Ausklang der drei Praktikumslektionen** haben Sie während weiterer **20 Minuten** Zeit, die Resultate Ihrer Kolleginnen und Kollegen an den vier Pinwänden zu studieren. Ein **Zeitplan** für die heutigen drei Praktikumslektionen hängt an der **Wandtafel**.

Was muss ich während der ersten 90 Minuten tun?

1. **Bevor** Sie die ersten Experimente starten, machen Sie sich **selbständig** ein paar **Gedanken**. Nehmen Sie sich ruhig etwa **30 Minuten** Zeit dafür. Dazu gehört auch das Lesen *dieser* Lenkung und der anderen Unterlagen wie Rechenhilfe, Sicherheitshinweis, Bedienungsanleitung und Tabellen. Lesen Sie diese ganz durch, **bevor** Sie anfangen.
2. Suchen Sie sich dann aus dem Angebot an Ihrem Arbeitsplatz das heraus, was **Sie am meisten interessiert!** Ich habe Ihnen verschiedene Salze wie Natriumchlorid und Kaliumchlorid sowie Salzsäure, Natronlauge und Essigsäure als Lösungen bereitgestellt. Sie sparen sich fürs erste die Zeit, Lösungen herzustellen.

3. Fühlen Sie sich ebenfalls frei, mit anderen Konzentrationen zu arbeiten, falls Sie dies für nötig halten. Es liegt ganz an Ihnen, was Sie untersuchen wollen.
4. Sie können sich nach Lust und Laune auch gerne am **Lehrerpult** bedienen und die dort bereitgestellten Chemikalien, Lösungen und Produkte benutzen. Bitte bringen Sie diese nach Gebrauch *sofort* zurück, damit andere nicht auf Sie warten müssen.
5. Es bleiben Ihnen nach dem Studium der Lektüre **noch weitere 60 Minuten** für die Experimente. Sie können während dieser Zeit natürlich spontan neue Ideen aufgreifen oder andere fallen lassen und das erforschen, was Sie interessiert.

Wichtig sind folgende Dinge:

- ➔ Schreiben Sie Ihre **Gedanken und Überlegungen** zu den **Experimenten ausführlich** in Ihr **Laborjournal** auf und grenzen Sie diese von Ihren üblichen Notizen **deutlich** ab. Schreiben Sie bitte mit **Kugelschreiber** oder **Füllfeder**.
- ➔ Schreiben Sie ebenfalls Ihre **Schlussfolgerungen** und **Fragen** auf. Streichen Sie nicht einfach Ihre Notizen durch, auch wenn diese Ihnen **noch so abwegig** oder **vage** erscheinen.
- ➔ Es geht hier **nicht** in erster Linie um falsch oder richtig, sondern um Ihre eigene **Kreativität!**

Ich sammle die Laborjournale ein, sobald Sie mit dem Aushängen der A3-Blätter fertig sind! Ich werde jeden eigenständigen Gedanken, jedes selbständige Experiment mit einem Glühbirnensymbol (Stempel) honorieren!

Welche Geräte benutze ich dazu?

- Es steht Ihnen ein selbstgebautes **Leitfähigkeitsmessgerät** zur Verfügung. Sie kennen dieses Gerät bereits aus dem Unterricht! Das Gerät ist bereits so zusammengebaut, dass Sie die Messung mit Hilfe der **beiliegenden Bedienungsanleitung** *gleich* starten können.

Wie wird das A3-Blatt erstellt?

- Auf dieses **A3-Blatt** schreiben Sie von Hand Ihren **Namen** und einen **Titel** zu den *Entdeckungen*, die Sie gemacht haben. Eine Vorlage finden Sie in den Unterlagen. Denken Sie daran, dass das A3-Blatt für Ihre Kolleginnen und Kollegen *verständlich* sein sollte. Halten Sie sich kurz. Sie haben hierfür **20 Minuten** Zeit. Das A3-Blatt wird nicht benotet.
- Papier, Filzstifte und Klebstreifen sowie mehrere A4-Blätter Millimeterpapier für die grafische Gestaltung des A3-Blatts liegen an Ihrem Arbeitsplatz bereit. A3-Blätter liegen neben dem Lehrerpult auf.
- Danach hängen Sie Ihr A3-Blatt an eine der vier Pinwände aus, die im Labor verteilt sind.

Ausstellung der Resultate

- Nun kann der **Austausch von Resultaten im Plenum** starten. Sie haben **weitere 20 Minuten** dafür Zeit. Gehen Sie zu einem A3-Blatt Ihrer Kollegin oder Ihres Kollegen und lassen Sie sich *inspirieren*. Sie können auch bei Ihrem A3-Blatt stehen bleiben und auf Gäste warten.
- Die A3-Blätter werden am Schluss der drei Praktikumslektionen noch eine Woche hängengelassen. Vielleicht wollen Sie ja das eine oder andere noch mit Ihrer Kollegin oder Ihrem Kollegen besprechen. Danach stehen die A3-Blätter zu Ihrer Verfügung.

→ *Ein solcher Austausch von Resultaten ist ganz typisch für viele wissenschaftliche Kongresse zu aktuellen Themen aus der Physik, Chemie, Biologie oder Medizin. Es treffen sich dort die Spezialisten und Forscher aus aller Welt, welche sich mit ihren Fachkollegen über die neusten Resultate austauschen.*

Noch ein paar Tips

- Versuchen Sie nicht, einfach alle Salze zu mischen!
- Nehmen Sie am Anfang nur eine Sorte separat und untersuchen Sie diese gemäss **Ihrem** Interesse!
- Stellen Sie Vergleiche mit anderen Chemikalien an!

Eine persönliche Bemerkung

- Persönlich hat mich die Leitfähigkeit von Salzlösungen in der Schule fasziniert. Gerne hätte ich mich damit vertieft auseinandergesetzt und selbständig Experimente durchgeführt, was aber der Chemieunterricht meiner Schulzeit nicht zuliess.
- *Hier ist das anders! Sie können **90 Minuten lang nach Lust und Laune** experimentieren und studieren, was **Sie** interessiert!*

Ich wünsche Ihnen viel Freude beim Experimentieren!

C. Hinweis auf Prüfung, Bewertung und Beurteilung

Fortsetzung Lenkung...

Gibt es eine Note?

Ja, es gibt eine Note. Und Sie können dabei eigentlich nur *gewinnen!*

Am Schluss erwarte ich von Ihnen *mindestens einen* eigenen Gedanken zu einem eigenen Experiment in Ihrem Laborjournal. Pro „Glühbirne“ erhalten Sie einen Punkt.

Die Notenskala habe ich folgendermassen festgelegt:

- Für fünf eigene Gedanken zu fünf eigenen Experimenten oder Überlegungen bekommen Sie fünf Punkte. Das ergibt die Note 6.
- Für vier eigene Gedanken zu vier eigenen Experimenten oder Überlegungen bekommen Sie vier Punkte. Das ergibt die Note 5.5.
- Für drei eigene Gedanken zu drei eigenen Experimenten oder Überlegungen bekommen Sie drei Punkte. Das ergibt die Note 5.
- Für zwei eigene Gedanken zu zwei eigenen Experimenten oder Überlegungen bekommen Sie zwei Punkte. Das ergibt die Note 4,5.
- Für einen eigenen Gedanken zu einem eigenen Experiment oder einer eigenen Überlegung bekommen Sie einen Punkt. Das ergibt die Note 4.

➔ *Die einzige Bedingung für diese Gedanken und Experimente ist, dass sie wirklich von **Ihnen** stammen. Sie müssen nicht mit dem übereinstimmen, was die Wissenschaft zu diesem Thema in den letzten 100 Jahren herausgefunden hat. Aber Sie müssen **Ihre Gedanken** mit einer **Begründung** untermauern und angeben, warum Sie dieses oder jenes Experiment gewählt haben und was Sie sich dabei **gedacht** haben.*

Teil 2: Dokumente für die Lehrperson

Wichtige Vorinformation an die Lehrperson

Die hier verwendete Unterrichtsmethode „*Gelenktes Entdeckendes Lernen*“ beinhaltet eine schriftliche *Lenkung*.

Das *Informationsangebot* inklusive *Lenkung* für die Lernenden ist entsprechend aufgelistet oder in Form von Arbeitsblättern und Unterlagen gekennzeichnet und kopierfertig eingerahmt. Es wird den Lernenden vollständig ausgehändigt. Daneben gibt es **keine** weiteren Hilfsmittel.

Die Lehrperson ist angehalten, sich möglichst **vollständig** aus dem Unterricht herauszuhalten. Sie beantwortet **keinerlei Fragen zum Stoff** und beschäftigt sich während der ganzen Zeit mit anderweitigen Dingen. Lediglich aus *Sicherheitsgründen* ist die Lehrperson zugegen und kann im Falle eines Unfalls helfend eingreifen.

Es findet im Nachgang des Entdeckenden Lernens kein Nachbessern dessen statt, was die Lernenden herausgefunden haben.

*Es ist von Vorteil, wenn die Lehrperson **genügend Ersatzteile** und **Reservegeräte** bereithält! Dies für den Fall, dass ein Leitfähigkeitsmessgerät oder Multimeter aussteigen sollte.*

A. Erforderliches Vorwissen

Generelles

Die Lernenden sind ausschliesslich Besucher des **Ergänzungsfachs Chemie** oder des **Schwerpunktfachs Chemie/Biologie**. Sie besitzen kurz vor der Matura bereits ein breites Wissen und praktisches Können im Fach Chemie.

Ionenwanderung (Theoriestunden)

Die Lernenden haben in der **unmittelbar** vorangegangenen Doppelstunde das Experiment zur *Wanderung* von MnO_4^- -Ionen im elektrischen Feld gesehen und behandelt (Försterling 1985, 254-255). Hierzu wurde eine Lernaufgabe zum Vergleich der reinen Diffusion von MnO_4^- in Wasser und deren Ionenbeweglichkeit im elektrischen Feld durchgeführt, welche von 80% der Lernenden gemeistert wurde. Sie haben verstanden, dass die Ionen in einem elektrischen Feld wandern.

Grundbegriffe der Elektrostatik und der Stromlehre (Theoriestunden)

Weiter wurden in den vorangegangenen Stunden die Grundbegriffe der Elektrostatik und der Stromlehre wie **elektrisches Feld, Spannung, Stromstärke, Widerstand, Wechselstrom** kurz repetiert. Den Lernenden sind diese Begriffe bereits aus dem Physikunterricht bekannt. Der Chemieunterricht wurde diesbezüglich mit dem Physiklehrer abgestimmt. Die Lehrperson hat das Wissen der Lernenden mit einem Test überprüft. Dieser Test wurde im Klassenverbund korrigiert, damit aufgetretene Unklarheiten sogleich beseitigt werden konnten.

Leitfähigkeit einer Salzlösung (Theoriestunden)

Die Lernenden wissen ebenfalls aus den vorangegangenen Theoriestunden, dass man die Leitfähigkeit einer $0,10 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ Natriumchloridlösung mit einer Flachbatterie als Spannungsquelle und einer Glühbirne in Serie geschaltet nachweisen kann. Sie wissen, dass Salzlösungen den Strom leiten.

Leitfähigkeit einer $0,100 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ KCl-Lösung (Praktikum)

Ebenfalls haben die Lernenden in der letzten Praktikumsstunde schon erste Erfahrungen mit dem Bedienen des selbstgebauten Leitfähigkeitsmessgerätes gemacht. Dabei haben die Lernenden den Widerstand in (Ω) einer $0,100 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ KCl-Lösung bestimmt. Anhand des Tabellenwerts für die **spezifische Leitfähigkeit κ** in (mS/cm) dieser KCl-Lösung haben die Lernenden unter Anleitung die **Zellkonstante C** der Messzelle in (cm^{-1}) ermittelt. Die Lernenden wurden mit den Umrechnungen und den dazugehörigen Messgrössen und Einheiten vertraut gemacht (Partnerarbeit mit leistungshomogenen Gruppen).

Weitere praktische Fertigkeiten im Labor

Die Lernenden sind mit dem Umgang gefährlicher Chemikalien vertraut. Sie bringen kurz vor der Matura bereits eine mehrjährige Laborpraxis mit. Sie kennen die gängigen Sicherheitsvorschriften für das Arbeiten im chemischen Labor. Sie sind auch mit der Bedeutung der üblichen **Gefahrensymbole** vertraut und wissen, wie sie sich schützen können. Die Lernenden sind mit den Regeln der Stöchiometrie und dem Herstellen von Lösungen (molare Grössen) vertraut. Die Lernenden sind mit Säure/Base-Titrationen und der Anwendung von $\text{p}K_s$ -Tabellen (pH-Berechnungen, etc.) ebenfalls vertraut. Ebenso ist den Lernenden die Fällung von schwerlöslichen Salzen aus dem Praktikum im Grundlagenfach Chemie bekannt. All dies wurde vorgängig parallel zum Thema „aquatische Chemie“ in Form eines Labortests überprüft.

Mögliche Einbettung in den Unterricht

Umweltchemie / Ökologie (Ergänzungsfach Chemie, Schwerpunktfach Chemie/Biologie)

Im **Ergänzungsfach** Chemie wird das Thema **Umweltchemie** für die Systeme Wasser, Boden und Luft behandelt. Das Thema eignet sich ebenso für den Ökologieunterricht im Rahmen des Schwerpunkt-fachs Chemie/Biologie.

Als Teilgebiet behandelt die Lehrperson gerade die **aquatische Chemie** der organischen und anorganischen Schad- und Nährstoffe (Stumm 1996). Viele dieser Stoffe liegen in den Gewässern in gelöster Form vor. Der Besuch einer Kläranlage steht ebenfalls auf dem Programm. Es geht neben der Abwasserreinigung um die qualitative Beurteilung der Trinkwasserqualität. Diese kann mittels Leitfähigkeitsmessung relativ rasch und einfach ermittelt werden. Dieser Sachverhalt soll aber nicht bis in alle Tiefen der Elektrochemie erklärt werden. Die Lernenden würde dies eher überfordern.

Stattdessen soll mit Hilfe des Entdeckenden Lernens den Lernenden selber die Gelegenheit gegeben werden, die Leitfähigkeit einer Lösung in Abhängigkeit beispielsweise von der Elektrolytkonzentration und der Art der Elektrolyte erforschen zu können. Die Erforschung solcher Sachverhalte hat zu mehreren Nobelpreisen in Chemie geführt (Onsager 1968). Dabei sollen die Resultate nicht weiter quantitativ im Unterricht gebraucht werden. Vielmehr sollen die Lernenden für die Thematik der gelösten Schad- und Nährstoffe wie Salze, Säuren und Basen in aquatischen Systemen *sensibilisiert* werden.

Es wird danach der Bezug zur Bodenchemie und Bodenbiologie geschaffen. Die Thematik der Überdüngung und der Schwermetallbelastung wird eingehend unter dem Aspekt des Stofftransports in Böden behandelt (Gisi 1990). Ebenfalls kommt die Wirkung des sauren Regens im Wasser, Boden, Wald und Luft eingehend zur Sprache.

Alternative: Biochemie und Medizin (Schwerpunkt-fach Chemie/Biologie)

Seit einiger Zeit erregen die Diskussionen um sogenannte **Ionenkanäle** das Interesse der Mediziner und Biochemiker (Agre 2002). Solche Ionenkanäle sind unter anderem für viele **physiologische Vorgänge** im Körper verantwortlich und wesentlich für die Funktion des **Nervensystems**, des **Gehirns** und nicht zuletzt des **Herzens** zuständig.

Die Lernenden behandeln dies im Rahmen des Schwerpunkt-fachs Chemie/Biologie unter dem Thema „Biochemie und Medizin“. Die Lehrperson kommt dabei auf die Bedeutung des **Stoffwechsels** und die **Chemie der Enzyme** zu sprechen. Es werden ebenfalls die Ionenkanäle angesprochen.

In einem Vorversuch zum Entdeckenden Lernen wird den Lernenden gezeigt, dass Ionen im elektrischen Feld wandern können (MnO_4^- -Ionen im elektrischen Feld). Die Lernenden erhalten die Gelegenheit für eigene Versuche. Es wird der Bezug zur Leitfähigkeit wässriger Elektrolytlösungen geschaffen. Nach dem Entdeckenden Lernen werden im Rahmen des Themas „Biochemie und Medizin“ verschiedene genetische Verfahren behandelt. Als Paradebeispiel wird im Praktikum eine DNS-Analyse durchgeführt. Dies geschieht klassischerweise mittels Gelelektrophorese z.B. in Agarose (Försterling 1985, 255-256). Danach wird der Bezug zur Kriminalistik geschaffen, wo solche Analysen zur Aufklärung von Gewaltverbrechen eingesetzt werden.

B. Simulation möglicher Ergebnisse

In diesem Abschnitt soll anhand einer realistischen Simulation aufgezeigt werden, was die Lernenden alles während der Entdeckungsphase selbständig entdecken könnten.

Bevor dies geschieht, sollen zuerst ein paar Vorbemerkungen für die Lehrperson bezüglich der Leitfähigkeit in der Chemie gemacht werden.

B.1 Vorbemerkungen zur Leitfähigkeit in der Chemie

Der Autor hat in einem Vorversuch geprüft, inwieweit sich ein selbstgebautes Leitfähigkeitsmessgerät überhaupt für die Messung der spezifischen Leitfähigkeit eignet. Dies geschah aus der Überlegung heraus, dass an vielen Schweizer Gymnasien aus Kostengründen nicht genügend kommerziell erhältliche Leitfähigkeitsmessgeräte zur Verfügung stehen.

Dagegen stellt das selbstgebaute Leitfähigkeitsmessgerät eine günstige Alternative dar, so dass davon ein ganzer Klassensatz hergestellt werden kann.

Folgende Messanordnung wurde dafür verwendet:

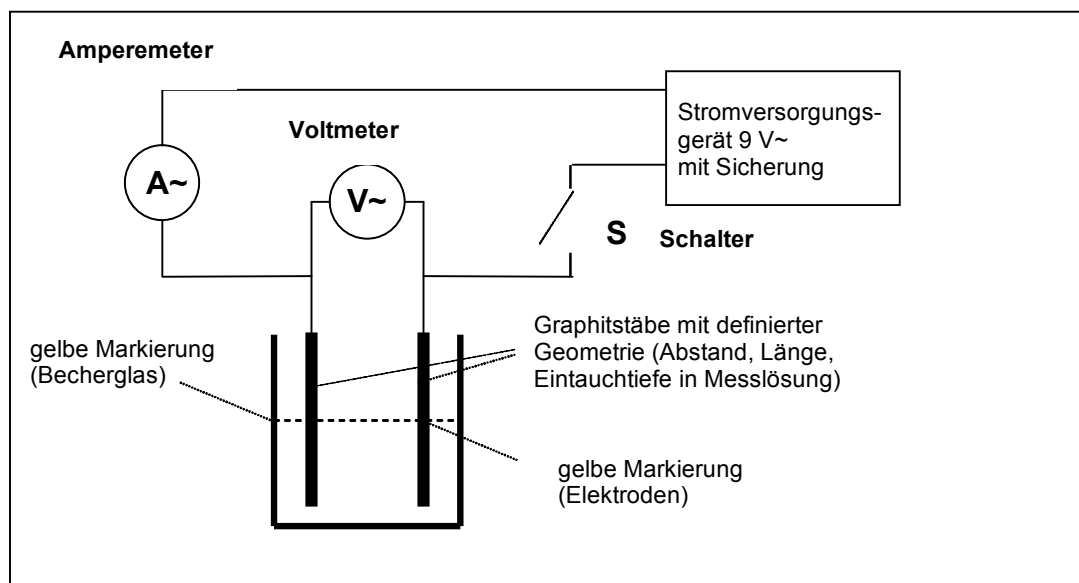


Abbildung 1. Schaltbild des selbstgebauten Leitfähigkeitsmessgerätes.

Die elektrische Spannung und die elektrische Stromstärke können jeweils leicht mit einem Multimeter gemessen werden.

Weitere Hinweise zum verwendeten Material kann die Lehrperson dem Informationsangebot (Teil 1, A) entnehmen. Genauere Angaben zur Gerätebedienung findet die Lehrperson in der Bedienungsanleitung (siehe S. 8-9).

Mit dieser Messanordnung wurde für verschiedene Salzlösungen die spezifische Leitfähigkeit bei 20°C bestimmt. Die Werte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1. Resultate der Leitfähigkeitsmessung mit dem selbstgebaute Leitfähigkeitsmessgerät. Die Literaturwerte stammen aus den Angaben des Application Bulletins der Firma Metrohm AG (Metrohm 1998).

Verbindung	Konzentration	Spannung	Stromstärke	Widerstand	Zellkonstante	spezifische Leitfähigkeit	spezifische Leitfähigkeit Literatur	relativer Fehler
	c (mol·l ⁻¹)	U (AC) (V)	I (AC) (mA)	R (Ω)	C (cm ⁻¹)	κ (mS/cm)	κ (mS/cm)	(%)
NaCl	0,010	11,0	0,7	15714	12,1	0,8	1,1	28%
NaCl	0,100	10,0	6,3	1587	12,1	7,7	9,7	21%
KCl	0,010	10,7	0,9	11889	12,1	1,0	1,3	20%
KCl	0,100	8,3	8,0	1038	12,1	11,7	11,7	Kalibration!
HCl	0,010	10,0	2,7	3704	12,1	3,3	3,8	14%
HCl	0,100	5,4	13,9	388	12,1	31,3	36,3	14%
HCl	0,500	2,1	20,8	101	12,1	120,3	169,0	29%
HCl	1,000	1,2	23,1	52	12,1	233,9	N.N.	
NaOH	0,010	10,5	1,6	6563	12,1	1,9	2,1	13%
NaOH	0,100	7,0	9,7	722	12,1	16,8	20,4	17%
NaOH	0,500	3,2	18,0	178	12,1	68,3	90,7	25%
NaOH	1,000	1,9	21,2	90	12,1	135,6	N.N.	

Anhand dieser Tabelle wird deutlich, dass sich die Messungen der spezifischen Leitfähigkeit mit dem selbstgebaute Leitfähigkeitsmessgerät gegenüber den Literaturwerten durchaus sehen lassen können. Die Messmethode ist für das vorliegende Entdeckende Lernen genug empfindlich.

Vor allem für niedrigere Konzentrationen könnten die Fehler noch minimiert werden, wenn ein empfindlicheres Amperemeter zur Verfügung steht. Ebenfalls könnte eine Wechselstromfrequenz von 1000 Hz statt der üblichen 50 Hz verwendet werden (Försterling 1985, 238). Damit könnte ebenfalls die Empfindlichkeit bei niedrigeren Konzentrationen verbessert und die Abweichung bei höheren Konzentrationen minimiert werden.

Vorteilhafterweise werden die Leitfähigkeitsmessungen zuerst bei 0,50 mol·l⁻¹ durchgeführt (vorbereitete Lösungen, siehe Lenkung), damit der Unterschied zwischen den verschiedenen Elektrolyten deutlich erkennbar wird.

Auf den nachfolgenden Abbildungen wird der Zusammenhang zwischen der Konzentration und der spezifischen Leitfähigkeit einer Elektrolytlösung gezeigt.

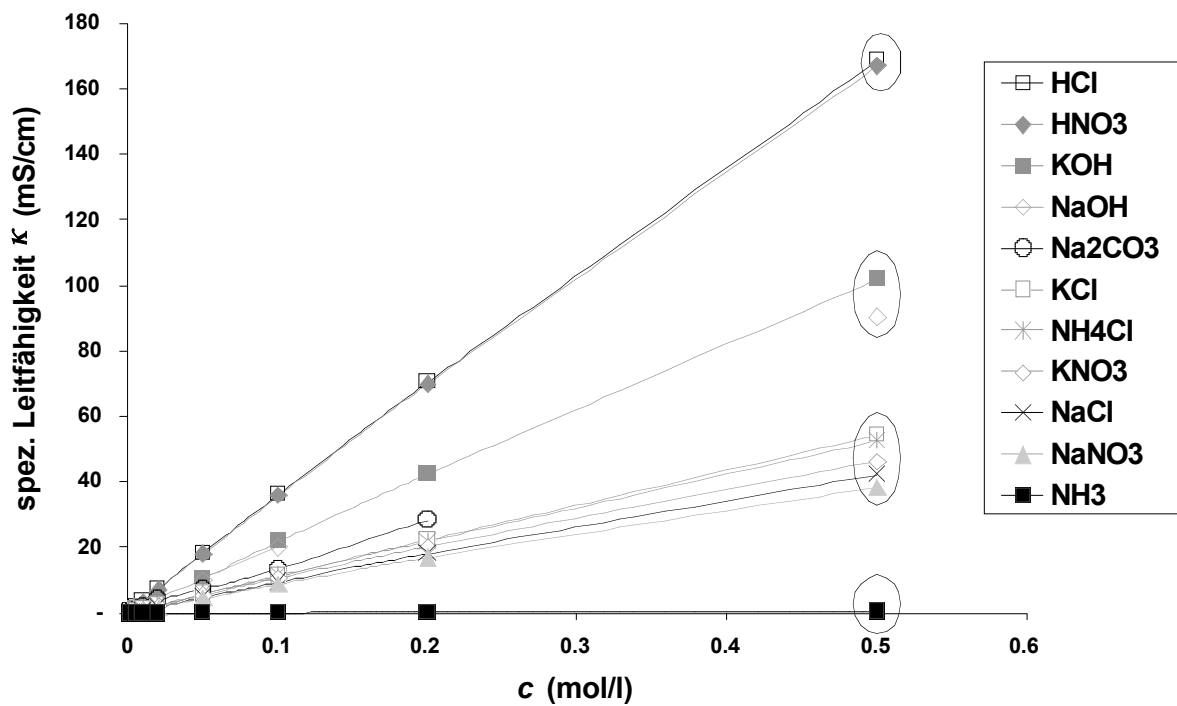


Abbildung 2. Spezifische Leitfähigkeit κ verschiedener Elektrolyte in Abhängigkeit der Elektrolytkonzentration (Metrohm 1998, 3).

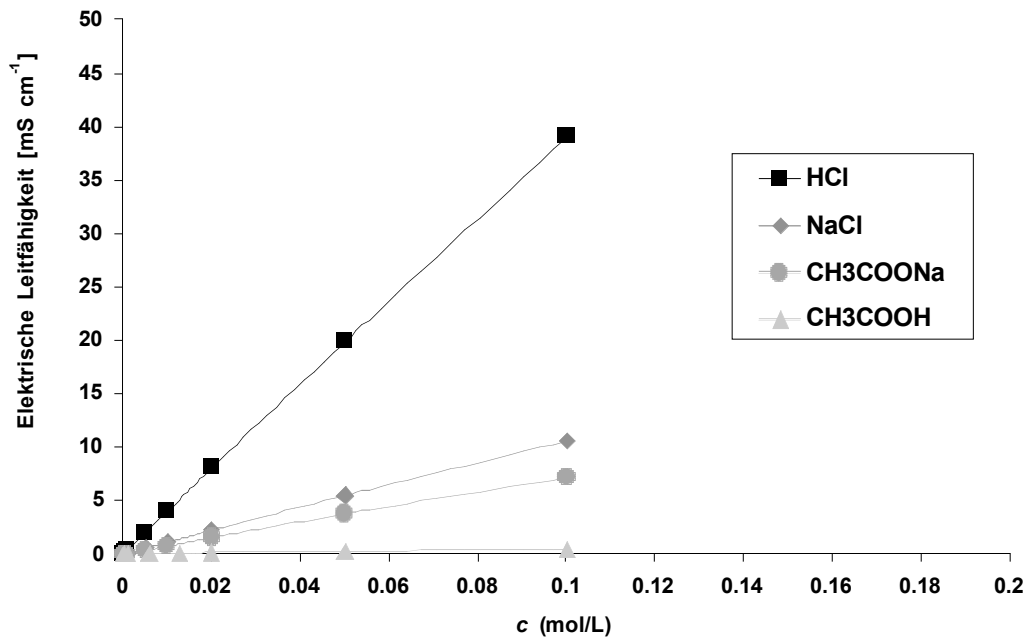


Abbildung 3. Spezifische Leitfähigkeit κ in Abhängigkeit der Elektrolytkonzentration, diesmal mit Essigsäure und Natriumacetat (Hamann 1998, 23).

B.2 Simulation

Basierend auf dem Vorwissen, der Lenkung und des Informationsangebots entdecken die Lernenden möglicherweise Teile der unten aufgelisteten Sachverhalte und Phänomene.

Diese Liste erhebt selbstverständlich keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es handelt sich hier lediglich um eine Simulation möglicher Entdeckungen. Es ist ein Vorschlag für die Lehrperson vermerkt, wie eine bestimmte Entdeckung im Laborjournal des Lernenden honoriert werden könnte. Die Lehrperson kann anhand dieser Liste entscheiden, wie weitere Entdeckungen honoriert werden. Die Schlussnote ergibt sich gemäss der Notenskala in Teil 2, C.

1) Die spezifische Leitfähigkeit hängt von der Art des Elektrolyten ab

- Die Lernenden erkennen durch das Messen der vorbereiteten $0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ Lösungen, dass deren spezifische Leitfähigkeit von der Art der Elektrolyte abhängt. Es können hier folgende Teilaspekte entdeckt werden:
 - Die Reihenfolge der Leitfähigkeit der Elektrolyte ($0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$) ergibt sich wie folgt: $\text{HCl} > \text{NaOH} > \text{KCl} \approx \text{NaCl} > \text{CH}_3\text{COONa} > \text{CH}_3\text{COOH}$. Die Lernenden stellen hierzu verschiedene Überlegungen an, weshalb dies der Fall sein könnte. Alle Gedankengänge werden anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
 - Die Lernenden entdecken, dass die starken Säuren und Basen deutlich höhere Leitfähigkeiten besitzen als deren Salze. Bei schwachen Säuren wie Essigsäure und ihren Salzen ist dies gerade umgekehrt. Die Lernenden stellen hierzu weitere Überlegungen an. **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
 - Die Lernenden entwickeln eigene, Hypothesen z.B. für die sehr hohe Leitfähigkeit starker Säuren. Sie entdecken weiter, dass die Leitfähigkeiten einer $0,50$ molaren Kaliumchlorid- und Natriumchloridlösung etwa gleich gross sind, hingegen die Essigsäure eine vergleichsweise niedrige Leitfähigkeit besitzt. Alle Gedankengänge werden anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
 - Die Lernenden entdecken, dass die H_3O^+ - und OH^- -Ionen den Strom am besten leiten. Alle Begründungen werden anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
 - Die Lernenden entdecken, dass die niedrige Leitfähigkeit von schwachen Säuren mit der niedrigen H_3O^+ -Konzentration (pH-Papier) zusammenhängt. Alle Gedankengänge werden anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
 - Die Lernenden entdecken, dass die niedrige Leitfähigkeit von Wasser mit der niedrigen H_3O^+ -Konzentration (pH-Papier) zusammenhängt. Alle Gedankengänge werden anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**

- Die Lernenden entdecken, dass die Leitfähigkeit einer verdünnten Säure bei einer bestimmten Konzentration als Maß für deren Stärke dient. Alle Gedankengänge werden anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**

2) *Die spezifische Leitfähigkeit hängt von der **Konzentration** des gelösten Elektrolyten ab*

- Die Lernenden erkennen z.B. durch das Vergleichen der $0,50 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ KCl-Lösung mit der $0,10 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ KCl-Lösung, dass die spezifische Leitfähigkeit von der Konzentration des Elektrolyten abhängt. Sie stellen Überlegungen an, wieso dies der Fall sein könnte. **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
- Die Lernenden erkennen z.B. durch den Vergleich verschieden konzentrierter Salzlösungen, dass die spezifische Leitfähigkeit von der Konzentration des Elektrolyten abhängt. Sie stellen Überlegungen an, wieso dies der Fall sein könnte. **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**

3) *Weitere Entdeckungsmöglichkeiten*

- Die Lernenden entdecken, dass die Leitfähigkeit einer Elektrolytlösung von der **Temperatur** abhängt.
 - Die Lernenden entdecken beispielsweise, dass die Leitfähigkeit einer wässrigen Salzlösung mit steigender Temperatur zunimmt! Sie versuchen sich dies anhand von Denkmodellen zu erklären. Alles wird anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
- Die Lernenden entdecken, dass die Leitfähigkeit einer Elektrolytlösung von der **Konzentration der gelösten Nichtelektrolyte** (z.B. Zucker) abhängen kann.
 - Die Lernenden entdecken beispielsweise, dass die Leitfähigkeit einer wässrigen Salzlösung mit zunehmendem Zuckergehalt sinkt! Sie versuchen dies anhand von Denkmodellen zu erklären. Die Lernenden stellen Hypothesen auf, dass z.B. die höhere Reibung der Ionen in einer dickflüssigen Zuckerlösung dafür verantwortlich sein könnte. Alles wird anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
- Die Lernenden führen eine **Säure/Base-Titration** durch.
 - Die Lernenden führen eine Säure/Base-Titration z.B. einer Salzsäure mit Natronlauge durch und beobachten eine dramatische Veränderung der Leitfähigkeit. Sie bringen diese Veränderung mit der Menge an zugegebener Base und/oder Säure in Verbindung. Alle Gedankengänge werden anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
 - Die Lernenden entdecken, dass die Säure/Base-Titration durch ein Leitfähigkeitsminimum geht. Sie bringen dieses Minimum mit der zugegebenen Menge an Säuren und Basen in Verbindung. Alle Gedankengänge werden anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**

- Sie entdecken weiter, dass dieses Leitfähigkeitsminimum mit dem Umschlagspunkt des Indikators übereinstimmt. Sie bringen dieses Minimum mit der zugegebenen Menge an Säuren und Basen in Verbindung. Alle Gedankengänge werden anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
- Die Lernenden führen eine Art „**Titration**“ durch, bei der schwerlösliche Salze ausfallen.
 - Die Lernenden führen eine Fällungsreaktion z.B. mit MgSO_4 - und BaCl_2 -Lösungen durch. Sie beobachten neben der Ausfällung von BaSO_4 eine dramatische Veränderung der Leitfähigkeit. Sie bringen diese Veränderung mit der zugegebenen Menge löslicher Salze (z.B. MgSO_4 , BaCl_2) und mit der ausgefällten Menge des schwerlöslichen Salzes (z.B. BaSO_4) in Verbindung. Alle Gedankengänge werden anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
 - Die Lernenden entdecken, dass die Fällung durch ein Leitfähigkeitsminimum geht. Sie bringen dieses Minimum mit der zugegebenen Menge löslicher Salze (z.B. MgSO_4 , BaCl_2) und mit der ausgefällten Menge des schwerlöslichen Salzes in Verbindung. Alle Gedankengänge werden anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
- Die Lernenden entdecken, dass man die Leitfähigkeitsmessung zur groben **Bestimmung des Salzgehaltes** einer wässrigen Lösung verwenden kann.
 - Die Lernenden verwenden die Leitfähigkeitsmessung zur Bestimmung des Salzgehaltes von Mineralwasser, Leitungswasser, destilliertem Wasser, Küchenwürze (Maggi), etc. Alle Gedankengänge werden anerkannt! **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
- Die Lernenden machen sich Gedanken darüber, wie die Leitfähigkeit von der **Ladung** der Ionen abhängen könnte.
 - *Dieser Sachverhalt ist komplex, deshalb werden alle Gedankengänge und Experimente in dieser Richtung anerkannt! Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.*
- Die Lernenden machen sich Gedanken darüber, wie die Leitfähigkeit von der **Grösse** der Ionen abhängen könnte.
 - *Dieser Sachverhalt ist komplex, deshalb werden alle Gedankengänge und Experimente in dieser Richtung anerkannt! Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.*
 - Die Lernenden stellen Hypothesen darüber auf, wie die Geschwindigkeit der Ionen in wässrigen Lösungen von deren „Grösse“ abhängt. Sie berücksichtigen hierzu die Hydrathülle. *Dies ist wieder recht komplex, deshalb werden alle Gedankengänge in dieser Richtung anerkannt! Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.*

- Die Lernenden vergleichen die Leitfähigkeit verschiedener organischer und anorganischer Verbindungen gleicher Konzentration in Lösung. So z.B. CH_3COONa und NaCl . Dabei bemerken die Lernenden, dass das CH_3COO^- -Ion grösser als das Cl^- -Ion ist. Sie überlegen sich, wie die Leitfähigkeit mit der Grösse der Ionen in Verbindung gebracht werden kann. *Dies ist komplex, deshalb werden alle Gedankengänge in dieser Richtung anerkannt!* **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
- Die Lernenden führen verschiedene Leitfähigkeitsmessungen von **Carbonsäuresalzen** durch und vergleichen deren Leitfähigkeit bei gleicher Konzentration. So z.B. CH_3COONa und $\text{C}_6\text{H}_5\text{COONa}$. Dabei bemerken die Lernenden, dass das CH_3COO^- -Ion kleiner als das $\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^-$ -Ion ist. Sie überlegen, wie die Leitfähigkeit mit der Grösse der Ionen in Verbindung gebracht werden kann. *Dies ist komplex, deshalb werden alle Gedankengänge in dieser Richtung anerkannt!* **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
- Die Lernenden führen verschiedene Leitfähigkeitsmessungen von **Tetraalkylammoniumsalzen** durch und vergleichen deren Leitfähigkeiten bei gleicher Konzentration. So z.B. $\text{N}(\text{CH}_3)_4\text{Cl}$ und $\text{N}(\text{C}_3\text{H}_7)_4\text{Cl}$. Dabei bemerken die Lernenden, dass das $\text{N}(\text{CH}_3)_4^+$ -Ion kleiner als das $\text{N}(\text{C}_3\text{H}_7)_4^+$ -Ion ist. Sie überlegen, wie die Leitfähigkeit mit der Grösse der Ionen in Verbindung gebracht werden kann. *Dies ist komplex, deshalb werden alle Gedankengänge in dieser Richtung anerkannt!* **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**
- Die Lernenden führen z.B. mit Essigsäure eine Verdünnungsreihe durch und messen die entsprechenden Leitfähigkeiten. Sie versuchen, die gefundenen Werte in Bezug zur Dissoziationskonstante K_s der Essigsäure zu bringen. *Dies ist komplex, deshalb werden alle Gedankengänge in dieser Richtung anerkannt!* **Für jeden separaten Gedankengang oder jedes separate Experiment: ▶ 1 Punkt.**

B.3 Möglicher Stundenablauf

<i>Method/Technik</i>	<i>Unterrichtsgeschehen</i>	<i>Hilfsmittel</i>	<i>Bemerkungen</i>	<i>Zeit</i>
Einstieg Entdeckendes Lernen zum Thema Leitfähigkeit: Lenkung	<ul style="list-style-type: none"> Die Lernenden betreten das Labor und begeben sich an ihren bereits vorbestimmten (mit Namen versehenen) Arbeitsplatz. Die Lernenden lesen die Lenkung und studieren die Unterlagen (Minilehrtext, Anleitung, Tabellen, etc.), die Chemikalien und die Materialien. 	<ul style="list-style-type: none"> Schriftliche <i>Lenkung</i> mit Informationsangebot (alle Unterlagen, Chemikalien und Materialien) Namensschilder 	Der Arbeitsplatz ist bereits vorbereitet. Die Lenkung erfolgt schriftlich. Die Lernenden lesen diese Lenkung für sich in Ruhe durch.	30'
Einzelarbeit: Hauptphase Entdeckendes Lernen	<ul style="list-style-type: none"> Die Lernenden starten die ersten Experimente, machen sich Notizen, messen mit der Leitfähigkeitszelle diverse Lösungen durch, werten die Messungen aus und entscheiden sich für das weitere Vorgehen. Je nach Vorlieben führen die Lernenden weitere Messungen mit Chemikalien vom Arbeitsplatz oder vom Lehrerpult durch. 	<ul style="list-style-type: none"> Schriftliche <i>Lenkung</i> mit Informationsangebot (alle Unterlagen, Chemikalien und Materialien) 	Die Lernenden arbeiten selbständig.	60'
Einzelarbeit	<ul style="list-style-type: none"> Die Lernenden stellen selbständig ihre Gedanken und Experimente auf einem A3-Blatt für die nachfolgende Ausstellung der Resultate zusammen. Die A3-Blätter werden an einer der vier Pinwände im Labor aufgehängt. Danach sammelt die Lehrperson die Laborjournale ein. 	<ul style="list-style-type: none"> Laborjournale, Millimeterpapier, Filzstifte, leere A3-Blätter, Klebstreifen, A4-Blätter, etc. 	Die Lernenden schreiben ihre Entdeckungen, Ideen und Gedanken selbständig auf.	20'
Plenum	<ul style="list-style-type: none"> Die Ausstellung der Resultate beginnt. Die Lernenden gehen umher und tauschen ihre Erkenntnisse aus. 	<ul style="list-style-type: none"> A3-Blätter 	Die Lernenden sind in Diskussionen involviert.	20'
Pause	<ul style="list-style-type: none"> Früher Schluss, da die Lernenden bereits ihre Pausen für das Entdeckende Lernen verwendet haben. 		Die A3-Blätter bleiben bis zur nächsten Laborstunde hängen (eventuell auch eine Woche lang).	

Hinweise:

Die ersten 90 Minuten finden durchgehend ohne Pause statt. Die Lernenden haben nach dieser Entdeckungsphase Zeit, selbständig ein A3-Blatt nach Vorgabe mit einer Auswahl ihrer Entdeckungen zu gestalten. Bei der Ausstellung der Resultate herrscht eine eher lockere Atmosphäre, die auch als Erholung und zur Wertschätzung der von den Lernenden geleisteten Arbeit dient.

Platzzuweisung der Lernenden

Die Lernenden bekommen ihren Arbeitsplatz im Labor von der Lehrperson zugewiesen. Die Lehrperson kann hierzu den Lernenden einen Plan der Labortische verteilen, worauf deren Namen eingetragen sind. Oder die Arbeitsplätze werden mit Namensschildern versehen.

C. Die Prüfung, Bewertung einer Dokumentation, Leistungsbeurteilung

Es findet *keine* Prüfung im Nachgang statt, vielmehr zählen für die Bewertung die Gedanken, Überlegungen und Experimente der Lernenden. Die Lernenden schreiben ihre Gedanken und Auswertungen ihrer Experimente in ein Laborjournal, welches danach von der Lehrperson eingesammelt wird.

Wichtig ist, dass die Gedanken und Experimente der Lernenden nicht nachgebessert werden. Es wird auch nicht auf absolute fachliche Korrektheit oder auf grammatisch richtig formulierte Sätze Wert gelegt.

Vielmehr sollen die eigenen Gedanken und Überlegungen der Lernenden sowie deren gedankliche Arbeit zu ihren Experimenten gewürdigt werden. Der Lernende erhält sein Laborjournal nicht mit Rotstift versehen zurück. Die Lehrperson wird lediglich die Gedanken, Überlegungen und Experimente im Laborjournal der Lernenden mit einem „Glühbirnensymbol“ honorieren. *Fünf solche „Glühbirnen“ ergeben fünf Punkte und somit die Note 6.*

Die Arbeit der Lernenden wird wie folgt bewertet:

- **fünf eigene Gedanken zu fünf eigenen Experimenten oder Überlegungen:**
→ **5 Punkte = Note 6**
- **vier eigene Gedanken zu vier eigenen Experimenten oder Überlegungen:**
→ **4 Punkte = Note 5,5**
- **drei eigene Gedanken zu drei eigenen Experimenten oder Überlegungen:**
→ **3 Punkte = Note 5**
- **zwei eigene Gedanken zu zwei eigenen Experimenten oder Überlegungen:**
→ **2 Punkte = Note 4,5**
- **ein eigener Gedanke zu einem eigenen Experiment oder einer eigenen Überlegung:**
→ **1 Punkt = Note 4**

Als Wertschätzung der selbständigen Arbeit der Lernenden werden die A3-Blätter an eine der vier grossen Pinwände im Labor aufgehängt. Es findet ein Austausch der Resultate wie auf einem wissenschaftlichen Kongress statt.

Die A3-Blätter werden nicht benotet. Sie sind das Produkt der Lernenden. Sie widerspiegeln das, was die Lernenden aus der Lernphase mitnehmen.

Die Lehrperson ist angehalten, während der ganzen Entdeckungsphase geeignete Massnahmen zu ergreifen, damit die Lernenden nicht voneinander abschreiben können.

Anhang: Literatur

Agre, P., King, L.S., Yasui, M., Guggino, W.B., Ottersen, O.P., Fujiyoshi, Y., Engler, A., Nelson, S.: Aquaporin water channels-from atomic structure to clinical medicine. In: Journal of physiology 542 (2002) 3-16.

Atkins, P.W.: Physikalische Chemie. Weinheim 1987 (VCH).

Christen, H.R.: Chemie. Aarau 1984. 12. Auflage (Sauerländer).

Försterling, H.D., Kuhn, H.: Praxis der Physikalischen Chemie. Weinheim 1985. 2. Auflage (VCH).

Gisi, U., Schenker, R., Schulin, R., Stadelmann, F.X., Sticher, H.: Bodenökologie. Stuttgart 1990 (Thieme).

Hamann, C. H., Hamnett, A., Vielstich, W.: Electrochemistry. Weinheim 1998 (Wiley-VCH).

Herrler, R., Winkler, H.-G.: Chemie-Tabellen. Köln 1976 (Aulis).

Kielland, J.: Individual activity coefficients of ions in aqueous solutions. In: Journal of the american chemical society 59 (1937) 1675-1678.

Metrohm AG, Konduktometrie. Application Bulletin 102/1d. Herisau 1998 (Methrom).

Onsager, L.: The motion of ions: principles and concepts. Nobel lecture. Stockholm 1968 (Royal swedish academy of science).

Robinson, R.A., Stokes, R.H.: Electrolyte solutions. New York 1959. 2nd revised edition (Dover).

Stumm, W., Morgan, J.J.: Aquatic chemistry. New York 1996. 3rd edition (Wiley-Interscience).