

Vorstellungen von Schülern über Elektrochemie

—

eine Interviewstudie

Eine

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Pädagogik

von

Nils Burger

1. Gutachter: Prof. Dr. Hans-Jürgen Schmidt

2. Gutachterin: Prof. Dr. Insa Melle

Universität Dortmund, Fachbereich Chemie

Dortmund 2000

Keine Begierde ist natürlicher als die
Wißbegierde. Wir erproben alle Mit-
tel, die uns Erkenntnis verheißen.
Wenn wir mit dem Denken nicht
weiterkommen, behelfen wir uns mit
der Erfahrung.

(MONTAIGNE, 1998, Seite 537)

Ich danke **Prof. Dr. Hans-Jürgen Schmidt** für die interessante Themenstellung und für seine unermüdliche Unterstützung, sowie **Holger Eybe, Dr. Annette Marohn, Prof. Dr. Jürgen P. Pohl** und **Pia Winkelkotte** für ihre wertvollen Anregungen.

Mein besonderer Dank gilt den Schülern, die sich bereit erklärten, an der vorliegenden Untersuchung teilzunehmen.

Inhalt

1	EINLEITUNG	8
2	HINTERGRUND.....	11
2.1	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	11
2.2	BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN ÜBER SCHÜLERVORSTELLUNGEN ZUR ELEKTROCHEMIE.....	18
2.3	SCHÜLERVORSTELLUNGEN ZUR ELEKTRIZITÄTSLEHRE	29
2.3.1	Schüler ziehen den Strombegriff dem Potentialbegriff vor.....	32
2.3.2	Stromverbrauchsvorstellung	33
2.3.3	Differenzierung von Spannung und Strom.....	34
2.3.4	Die Bedingung $I = \text{konstant}$	34
2.3.5	Die lokale Argumentation.....	35
2.3.6	Die sequentielle Argumentation	35
2.3.7	Der Widerstandsbegriff.....	36
2.3.8	Leitungsmechanismus in Metallen	36
2.3.9	Zwei Modelle zur Beschreibung von Schülervorstellungen.....	36
2.3.9.1	Schülerenergiebetrachtung (VON RHÖNECK & VÖLKER, 1984).....	36
2.3.9.2	Quelle-Verbraucher-Modell (ANDERSON, 1984)	37
3	ZIELE.....	39
4	METHODE.....	42
4.1	UNTERSUCHUNGSPLAN.....	42
4.2	PLANUNG UND DURCHFÜHRUNG DER INTERVIEWS	44
4.2.1	Planung der Interviews	44
4.2.2	Die Interviewpartner.....	46
4.2.3	Durchführung der Interviews	47
4.2.3.1	Der Interviewplan.....	47
4.2.3.2	Die Interviewsituation	58
4.3	DATENAUFBEREITUNG	59
4.4	ANALYSE DER DATEN	59
4.4.1	Die zusammenfassende Inhaltsanalyse	61
4.4.1.1	Die Kategoriendefinition	62
4.4.1.2	Die Codierung.....	65
4.4.1.3	Die Reorganisation.....	66
4.4.1.4	Die Zusammenfassung.....	66
4.4.2	Das Herausarbeiten der Argumentationsstränge.....	68
4.4.3	Der Vergleich der Interviews	68

5	DARSTELLUNG UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE.....	70
5.1	DIE TREIBENDE KRAFT ELEKTROCHEMISCHER REAKTIONEN	72
5.1.1	Galvanische Zelle	73
5.1.2	Elektrolysezelle	74
5.1.3	Zyklus bestehend aus Laden und Entladen	76
5.1.3.1	Aufbau mit undurchlässiger Trennwand (S9)	77
5.1.3.2	Aufbau mit durchlässiger Trennwand (S9)	78
5.1.4	Diskussion.....	79
5.2	ELEKTRODENREAKTIONEN	80
5.2.1	Elektronenaustausch zwischen den Teilreaktionen.....	80
5.2.2	Chemisches Gleichgewicht	82
5.2.2.1	Verschleierung der Notwendigkeit eines Elektronenaustausches.....	82
5.2.2.2	Verschiebung des Gleichgewichtes durch Elektronenaustausch	84
5.2.3	Verknüpfung von Reaktionstyp und Polung der Elektrode.....	86
5.2.4	Diskussion.....	87
5.3	ELEKTRIZITÄTSLEHRE	90
5.3.1	Vorstellungen aus der Elektrizitätslehre in der Elektrochemie.....	90
5.3.2	Konsequenzen für die Elektrochemie	92
5.3.2.1	Beschreibung einer zeitlichen Abfolge	92
5.3.2.2	Elektronentransport durch den inneren Stromkreis	98
5.3.2.3	Stromverbrauchsvorstellung und Quelle-Verbraucher-Modell	105
5.3.3	Diskussion.....	109
5.4	VORGÄNGE IN DEN LÖSUNGEN	120
5.4.1	Ionen in der Lösung	121
5.4.2	Leitungsmechanismus in der Lösung.....	122
5.4.2.1	Teilchen als Elektronentransporter	123
5.4.2.2	Eigenschaften des Wassers	126
5.4.2.3	Elektronen werden von einem Ion zum nächsten gereicht.....	126
5.4.3	Richtung des Ladungstransportes in den Lösungen.....	127
5.4.4	Diskussion.....	128
5.5	DIAPHRAGMA	135
5.5.1	Diaphragma verhindert Vermischen der Lösungen	136
5.5.2	Durchlässigkeit des Diaphragmas	136
5.5.3	Semipermeable Membran	140
5.5.4	Diskussion.....	141
5.6	BENUTZUNG VON BEGRIFFEN	146
5.6.1	'Pluspol', 'Minuspole' und 'positiv', 'negativ'	147
5.6.1.1	Beschriftung der Elektrolysezelle.....	149
5.6.2	'Anode' und 'Kathode'	151
5.6.2.1	Entwicklung im Gespräch.....	153

5.6.3	'Elektrolyse'	155
5.6.4	Diskussion.....	156
5.6.4.1	'Positiv'/'Negativ', 'Pluspol'/'Minuspole'.....	157
5.6.4.2	'Anode' / 'Kathode'.....	170
5.6.4.3	Elektrolyse	182
5.7	PERSPEKTIVENWECHSEL.....	184
5.7.1	Art der Perspektiven.....	186
5.7.1.1	Dynamischen Betrachtung \leftrightarrow statische Betrachtung.....	186
5.7.1.2	Die Ladung ist die Ursache für den Elektronenfluß \leftrightarrow Der Elektronenfluß ist die Ursache für die Ladung (dynamische Betrachtung)	188
5.7.1.3	Betrachtung der Elektrode aus Sicht des inneren Stromkreises \leftrightarrow des äußeren Stromkreises (dynamische Betrachtung).....	189
5.7.1.4	Elektronenaustausch zwischen der Elektrode und dem inneren Stromkreis \leftrightarrow dem äußeren Stromkreis (dynamische Betrachtung).....	191
5.7.1.5	Die Aussage, daß Elektronen abgegeben / aufgenommen werden, bezieht sich auf einzelne Teilchen \leftrightarrow auf die Elektrode als Ganzes (dynamische Betrachtung)	192
5.7.1.6	Die Aussage, daß Elektronen vom Minuspole zum Pluspol fließen, wird auf unterschiedliche Punkte des Stromkreises bezogen	193
5.7.2	Einige Ursachen für das Wechseln der Perspektive.....	195
5.7.2.1	Die Beschreibung einer zeitlichen Abfolge führt zum Perspektivenwechsel	195
5.7.2.2	Die Beschreibung unterschiedlicher Prozesse führt zum Perspektivenwechsel	198
5.7.2.3	Auswendig gelernte Definitionen führen zum Perspektivenwechsel	199
5.7.3	Diskussion.....	201
5.8	PROBLEME AUFGRUND DER GESTELLTEN AUFGABE	206
5.8.1	Die Darstellung der Quelle	206
5.8.2	Der ungewöhnliche Aufbau der Elektrolysezelle	209
6	ZUSAMMENFASSUNG DER DISKUSSIONEN.....	210
7	BEWERTUNG DER ERGEBNISSE	220
8	AUSBLICK.....	224
9	KURZFASSUNG.....	225
10	LITERATURVERZEICHNIS	229
11	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	238
12	TABELLENVERZEICHNIS	239

13	VERZEICHNIS DER STELLUNGNAHMEN	240
14	ANHANG.....	242
14.1	DIE KATEGORIEN DER ZUSAMMENFASSENDEN INHALTSANALYSE.....	242
14.2	DIE IN DEN INTERVIEWS VERWENDETEN SKIZZEN	246

1 Einleitung

In der vorliegenden Arbeit werden Schülervorstellungen zur Elektrochemie untersucht.

Der Grund für das Interesse an den Vorstellungen von Schülern¹ zu bestimmten naturwissenschaftlichen Themen ist die Erkenntnis aus der Psychologie, daß Lernen ein aktiver Prozeß ist, der entscheidend vom Vorwissen des Lernenden beeinflußt wird. Die Didaktik kann sich daher nicht darauf beschränken, die zu lernenden Inhalte aus rein fachlicher Sicht zu strukturieren, vielmehr sollten im Unterricht auch die Vorstellungen der Schüler berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, daß Schüler in einigen Fällen aufgrund logischer Überlegungen mit guten Gründen zu Aussagen kommen, die aus naturwissenschaftlicher Sicht falsch sind. Dennoch stellen diese Überlegungen oft eine große intellektuelle Leistung dar und sind ein Beleg für das analytische Denkvermögen der Schüler. Häufig ergeben sich Probleme aus der Struktur des zu lernenden Inhaltes. In einigen dieser Fälle können Wege aufgezeigt werden, über die Schüler durch einfache Hilfestellungen aus falschen Vorstellungen wissenschaftlich korrekte Beschreibungen der Natur ableiten können.

Zu diesem Zweck ist eine gute Kenntnis der Schülervorstellungen zu bestimmten Themen des Unterrichtes notwendig, die durch eine möglichst unvoreingenommene Auseinandersetzung mit den Argumenten der Schüler erlangt werden kann.

Das Unterrichtsthema, mit dem sich die vorliegende Arbeit beschäftigt, ist die Elektrochemie. Sie nimmt eine besonders wichtige Stellung im Chemieunterricht der gymnasialen Oberstufe ein. Zum einen, weil elektrochemische Pro-

¹ Diese und ähnliche Personenbezeichnungen sind geschlechtsneutral zu verstehen.

zesse (z. B. Korrosion) und technische Anwendungen der Elektrochemie (z. B. Batterien und Akkumulatoren) in der Lebenswelt der Schüler allgegenwärtig sind. Zum anderen, weil sich dieses Thema gut zur Vertiefung von Grundlagenwissen aus der allgemeinen und anorganischen Chemie eignet. Durch die analytische Betrachtung und die experimentelle Durchführung von elektrochemischen Experimenten kann in besonderer Weise logisches und komplexes Denken geschult werden. Daher ist die Elektrochemie ein verbindliches Thema für den Chemieunterricht der Sekundarstufe II (MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, 1981 und 1999).

Die oben erwähnte Tatsache, daß sich mit der Elektrochemie Grundlagenwissen vertiefen läßt, birgt jedoch auch Probleme. Denn Schwierigkeiten mit diesen Grundlagen sind für das Verstehen der Elektrochemie hinderlich. Die benötigten Kenntnisse entstammen nicht nur der Chemie (Redoxchemie, Ionentheorie, chemisches Gleichgewicht), sondern auch der Physik (Elektrizitätslehre). Daher ist die Elektrochemie eines der komplexesten Themen der Schulchemie. Es ist folglich nicht verwunderlich, daß eine empirische Studie ergeben hat, daß Schüler und Lehrer dieses Thema als besonders schwierig empfinden (BUTTS & SMITH, 1987a).

Um den Schülern das Lernen der Elektrochemie zu erleichtern, und um die oben erwähnten Ziele für den Chemieunterricht zu erreichen, ist eine gute Kenntnis der Schülervorstellungen zur Elektrochemie hilfreich.

An der Universität Dortmund werden diese Vorstellungen daher seit 1993 untersucht. Bei der ersten Untersuchung dieses Projektes haben Schüler aus dem gesamten Bundesgebiet Aufgaben zur Elektrochemie schriftlich bearbeitet (MAROHN, 1999). Die so gewonnenen Ergebnisse bilden den Ausgangspunkt der nun vorliegenden Interviewstudie. Diese setzt an Punkten an, die mit der schriftlichen Methode nicht greifbar sind. Durch den Vergleich der Ergebnisse beider Studien soll eine klare Beschreibung der Schülervorstellungen zu den grundlegenden Konzepten der Schulelektrochemie erarbeitet werden. Diese kann für den Chemieunterricht dienlich sein.

Daraus ergibt sich für die Arbeit folgender Aufbau. In Kapitel 2.1 werden die theoretischen Grundlagen beschrieben, aus denen sich das Interesse an den Schülervorstellungen ergibt und die das Vorgehen bei deren Untersuchung beeinflussen. Anschließend wird in Kapitel 2.2 ein Überblick über vorangegangene Untersuchungen von Schülervorstellungen zur Elektrochemie und zur Elektrizitätslehre gegeben. Vor diesem Hintergrund werden in Kapitel 3 die Ziele der vorliegenden Arbeit abgeleitet. Die zum Erreichen dieser Ziele entwickelten Methoden werden in Kapitel 4 beschrieben. Bei den Interviews handelt es sich um offene Gespräche, die durch Skizzen elektrochemischer Zellen strukturiert werden. So ist es möglich, die grundlegenden Vorstellungen der Schüler zur Elektrochemie zu untersuchen. Durch die Analyse werden die Argumentationsstränge aus den Interviews herausgearbeitet. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5 dargestellt und diskutiert. Bei der Diskussion werden die Ergebnisse anderer Forscher und fachwissenschaftliche Überlegungen zur Elektrochemie berücksichtigt. Dadurch kann Stellung zu konkreten Problemen des Chemieunterrichts bezogen werden. Diese Stellungnahmen sind als Argumente zu verstehen, die Lehrer bei ihrer Entscheidungsfindung berücksichtigen können. Eine Zusammenfassung der Diskussionen findet sich in Kapitel 6. Das Vorgehen bei der vorliegenden Untersuchung wird in Kapitel 7 ausgehend von Qualitätskriterien der empirischen chemiedidaktischen Forschung diskutiert und in Kapitel 8 wird ein Ausblick über mögliche nächste Schritte gegeben. Den Abschluß bildet eine Kurzfassung der gesamten Arbeit in Kapitel 9.

2 Hintergrund

2.1 Theoretische Grundlagen

Die theoretische Basis vieler Arbeiten der Naturwissenschaftsdidaktik ist der *Konstruktivismus* (ADEY, 1987; BODNER, 1986; DRIVER, 1989; KELLY, 1986; PINES & WEST, 1986; WHEATLEY, 1991), von dem es unterschiedliche Varianten gibt. Allein in der pädagogischen Literatur hat MATTHEWS 16 verschiedene Arten gefunden (KELLY, 1997).

Derzeit wird in der Literatur kontrovers diskutiert, ob der *Konstruktivismus* wirklich eine sinnvolle theoretische Basis für die Naturwissenschaftsdidaktik darstellt (KELLY, 1997; OSBORNE 1996; STAVER, 1998). Eine der wesentlichen Grundannahmen des *Konstruktivismus*, daß Wissen von Menschen konstruiert wird, ist jedoch allgemein anerkannt.

There can be no argument with its thesis that all knowledge is a human construction. In that sense we are all "trivial constructivists".

(OSBORNE, 1996)

In der vorliegenden Arbeit soll im weitesten Sinne untersucht werden, wie Schüler Chemie lernen. Dazu sind die von Psychologen entwickelten kognitiven Theorien des menschlichen Lernens von Interesse (EDELMAAN, 1986; GAGNÉ, 1969; LEFRANCOIS, 1986; SCHERMER, 1991; SHUELL, 1997).

Der Begriff *Kognition* steht allgemein für alle Formen des Erkennens und Wissens. Die *kognitive Psychologie* beschäftigt sich mit allen geistigen Prozessen und Strukturen. Dabei wird angenommen, daß das Verhalten eines Individuums durch seine Informationsverarbeitung bestimmen wird. Das setzt zwar die Aufnahme von Informationen aus der Umwelt voraus, menschliches Handeln wird aber nicht als direkte Reaktion darauf verstanden. Es ist ein aktiver Prozeß der Informationsverarbeitung bzw. *Kognition* zwischengeschaltet. Dabei werden vom Individuum aktiv Informationen gesucht, die es für seine Entscheidungen benötigt. Menschen reagieren nicht objektiv auf ihre Umwelt, sondern darauf, wie sich diese ihnen als subjektive Realität darstellt. Jeder Mensch konstruiert sich eine eigene Interpretation der Welt. Diese muß nicht

mit der objektiven Beschreibung der Welt – wenn eine solche überhaupt möglich ist – übereinstimmen. (ZIMBARDO, 1995).

In der vorliegenden Arbeit werden lerntheoretische Begriffe verwendet. Um Mißverständnisse zu vermeiden, werden diese nun kurz definiert.

In den *kognitiven Lerntheorien* versteht man unter *Lernen* die Aufnahme und Verarbeitung von Information. Dabei bildet das Subjekt *Begriffe* (s. unten) oder Handlungsmuster. Die *Begriffsbildung* ist ein aktiver Vorgang, bei dem das Individuum seine *kognitive Struktur* (s. unten) umorganisiert (EDELMANN, 1986).

Die kognitiven Lerntheoretiker verwenden das Wort '*Begriff*' nicht in der sonst üblichen Weise. Sie gehen davon aus, daß ein Individuum konkrete Einzelfälle zu Kategorien zusammenfaßt. Diese Kategorien werden auch *Begriffe* genannt. Die Kategorisierung geschieht anhand von Merkmalen (*kritischen Attributen*), über die ein Einzelfall verfügen muß, um einem *Begriff* zugeordnet zu werden. So ist beispielsweise für den *Begriff* 'Stuhl' eine einigermaßen waagerechte Sitzfläche ein *kritisches Attribut*. Die Tatsache, daß ein bestimmter Stuhl aus Holz ist, stellt hingegen kein *kritisches Attribut* dar. Der Inhalt eines *Begriffes* ist die Gesamtheit seiner *kritischen Attribute*, sein Umfang ist die Gesamtheit der durch ihn erfaßten Einzelfälle (EDELMANN, 1986).

Es wird zwischen *Eigenschaftsbegriffen* und *Erklärungsbegriffen* unterschieden. Der *Begriff* 'Stuhl' ist ein Beispiel für einen *Eigenschaftsbegriff*. Die Kategorisierung von Einzelfällen, die eine Erklärung der Erscheinungen beinhaltet, führt zu *Erklärungsbegriffen*. Unter einer Erklärung versteht man dabei die Unterstellung von Abhängigkeiten zwischen Ereignissen. Sie stellen im weitesten Sinne *Theorien* dar (s. unten). Ein Beispiel für einen *Erklärungsbegriff* ist die Aussage, daß Tag und Nacht durch die Drehung der Erde entstehen (EDELMANN, 1986).

Alle *Begriffe* beinhalten sachliche und emotionale Komponenten. Beispielsweise ist die sachliche Komponente des *Begriffes* 'Mutter', daß es sich um eine Frau handelt, die mindestens ein Kind geboren hat. Die emotionale Komponente entspricht der gefühlsmäßigen Beziehung zu dieser Frau oder zu Müttern

überhaupt (EDELMAAN, 1986). Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Betrachtung der sachlichen Komponente von *Begriffen*.

Manchmal ist von *Konzepten* die Rede. Im Zusammenhang mit den Lerntheorien sind *Konzepte* das gleiche wie *Begriffe* (EDELMAAN, 1986).

Das Wort oder Symbol, das einem *Begriff* zugeordnet wird, ist der *Begriffsname*. Diese Zuordnung ist beispielsweise zur Kommunikation notwendig. Nicht jedem *Begriff* ist ein *Begriffsname* zugeordnet. Die Zuordnung eines *Begriffes* zu einem *Begriffsnamen* wird erst durch eine Definition möglich. In der Alltagssprache meint man mit dem Wort 'Begriff' üblicherweise das, was die Psychologen als *Begriffsname* bezeichnen (EDELMAAN, 1986).

Werden *Begriffe* zu Begriffsketten kombiniert, so entstehen *Regeln*. Dabei ist zu beachten, daß das Erlernen von *Regeln* deren Verstehen voraussetzt und nicht mit einfachem Auswendiglernen gleichzusetzen ist (EDELMAAN, 1986).

Konstrukte sind *Begriffe*, die bewußt gebildet (konstruiert) werden. Diese Bezeichnung weist darauf hin, daß beispielsweise wissenschaftliche *Begriffe* von den Wissenschaftlern bewußt erfunden werden, um empirische Sachverhalte zu beschreiben und zu erklären (EDELMAAN, 1986).

Eine *Theorie* besteht aus einer Ansammlung von miteinander in Beziehung stehenden Aussagen. Sie dient dazu, Beobachtungen zusammenzufassen und zu erklären (LEFRANCOIS, 1986).

Gesetze sind Aussagen, bei denen man davon ausgeht, daß sie über jeden Zweifel erhaben sind. Sie stellen aber keine Wahrheiten dar. Sobald ein Gegenbeweis gefunden ist, gilt ein *Gesetz* als widerlegt (LEFRANCOIS, 1986).

Annahmen sind im Gegensatz zu *Gesetzen* persönlicher und privater Natur. Eine Person versucht mit Hilfe von Annahmen Tatsachen zu beschreiben (LEFRANCOIS, 1986).

Verfügt ein Subjekt nicht über das nötige *Wissen* (s. unten), um einen erwünschten Zielzustand direkt zu erreichen, kommen *Problemlöseverfahren* zur Anwendung (z. B. Versuch und Irrtum). Sie garantieren zwar nicht die Lösung des Problems, engen aber das Feld möglicher Verhaltensweisen stark ein (EDELMAAN, 1986).

Das *Wissen* einer Person entspricht allen Begriffshierarchien, Regelhierarchien und *Problemlöseverfahren*, über die diese Person verfügt (EDELMAAN, 1986).

Die *kognitive Struktur* eines Individuums besteht einerseits aus seiner *Wissens- und Wertestruktur* und andererseits aus seiner *Problemlösestruktur*. Die *Wissens- und Wertestruktur* stellt die Gesamtheit der ihm zur Verfügung stehenden *Begriffe* und deren Vernetzung dar. Die *Problemlösestruktur* ist die Gesamtheit aller dem Individuum zur Verfügung stehenden *Problemlöseverfahren* (EDELMAAN, 1986).

Das *Bezugssystem* (*frame of reference*) ist das gleiche wie die *kognitive Struktur*. Mit der Bezeichnung *Bezugssystem* wird hervorgehoben, daß das Individuum alle Sinneswahrnehmungen ausgehend von seiner *kognitiven Struktur* bewertet.

Unter *Vorstellungen* versteht man das gesamte organisierte *Wissen* eines Menschen über sich und seine Welt. Die *Vorstellungen* umfassen alle Informationen, über die ein Individuum verfügt und alle Handlungsalternativen, die es kennt (LEFRANCOIS, 1986). In diesem Sinne entsprechen die *Vorstellungen* der *kognitiven Struktur*.

In der vorliegenden Arbeit werden *Vorstellungen* von Schülern zur Elektrochemie untersucht. Damit ist nicht das gesamte organisierte *Wissen* der Schüler gemeint. Hier geht es lediglich um den sachlichen Teil ihrer *Vorstellungen*, den sie beim Nachdenken über Elektrochemie verwenden. Eine einzelne *Vorstellung* zur Elektrochemie ist entsprechend ein Ausschnitt aus diesem – vom Schüler – aktivierten *Wissen*. In der vorliegenden Arbeit interpretiert der Forscher die Aussagen der Schüler und versucht so, auf ihre *Vorstellungen* zu schließen.

Die Lerntheorien beschreiben das menschliche Lernen auf eine allgemeine Art. Sie beachten dabei nicht die Struktur des vom Individuum gelernten Inhaltes. Das ist der Ansatzpunkt der vorliegenden Arbeit. Im weitesten Sinne sollen hier die sachlichen Aspekte des Lernens von Elektrochemie untersucht werden.

Besonders beim Schulunterricht spielen neben Schüler- und Lehrervariablen u. a. die Sachstruktur des Faches und institutionelle Rahmenbedingungen eine Rolle. Man kann sagen, daß fast alle bisher vorliegenden *psychologischen* Lehr-Lern-Modelle diese Komplexität auf relativ wenige Bedingungs-Wirkungs-Zusammenhänge reduzieren.

(EDELDMANN, 1986, Seite 10)

Im folgenden werden die Kernaussagen zusammengefaßt, die die theoretische Basis der vorliegenden Arbeit bilden:

- *Wissen* wird nicht passiv erworben, sondern vom Individuum in einem aktiven Prozeß der Auseinandersetzung mit seinen Sinneswahrnehmungen konstruiert. Durch Aufnahme und Verarbeitung von Informationen strukturiert das Individuum seine *kognitive Struktur* um (EDELDMANN, 1986; WHETLY, 1991).
- Die *kognitive Struktur* jedes Menschen entwickelt sich im Laufe seines Lebens in einem evolutionären Prozeß. Da jeder Mensch einen anderen Werdegang hat, sind diese Strukturen bei verschiedenen Personen unterschiedlich.
- Ein Individuum bewertet alle Sinneswahrnehmungen ausgehend von seiner *kognitiven Struktur*. Diese wird daher auch als *Bezugssystem* bezeichnet. Die Sicht der Welt hängt folglich von den individuellen Vorerfahrungen einer Person ab. Daher kann es sein, daß die gleiche Situation von verschiedenen Personen unterschiedlich bewertet wird.
- Aufgrund der Unterschiedlichkeit von *Bezugssystemen* können Ideen und Gedanken nicht einfach in Sprache überführt und dadurch unverfälscht von einer Person auf eine andere übertragen werden. Der Sender einer Botschaft übersetzt seine Gedanken in Sprache. Der Empfänger muß die von ihm wahrgenommenen Worte und Sätze ausgehend von seinem *Bezugssystem* bewerten und ihnen somit eine Bedeutung zuordnen. Kommunikation beinhaltet folglich mindestens zwei Übersetzungsvorgänge (JOHNSON & GOTT, 1996). Daher ist passives Aufnehmen von *Wissen* unmöglich.

- Menschliches *Wissen* ist nicht einfach ein Spiegelbild einer Realität. Das gilt gleichermaßen für naturwissenschaftliche Erkenntnisse wie für die individuellen *Vorstellungen* eines Menschen².
- Die Wissenschaften fußen nicht auf einem allgemein und zeitlos gültigen Axiomensystem, sondern auf Paradigmata³, die "die Schöpfung einer bestimmten Epoche der Wissenschaft sind" (TOULMIN, 1991, Seite 144).
- Die Wissenschaften sind Teil des gesellschaftlichen *Wissens*. Es wird von der Gemeinschaft der Wissenschaftler konstruiert (ADEY, 1987). Dabei wird durch Kommunikation eine weitgehende Übereinstimmung der *Vorstellungen* der einzelnen Mitglieder der Gemeinschaft erreicht.
- Das Erlernen von Wissenschaften kommt einem Initiationsprozeß gleich. Um die Mitgliedschaft in einer Gesellschaft zu erlangen, muß sich der Neuling deren *Konstrukte* und Sprache aneignen (KELLY, 1997; KUHN, 1967; STENHOUSE, 1986).

Aus den Feststellungen, daß *Wissen* nicht einfach von einer Person (z. B. dem Lehrer) auf eine andere (z. B. dem Schüler) übertragen werden kann, und daß die Wahrnehmung der Umwelt durch die bereits vorhandenen *Vorstellungen* beeinflußt wird, resultiert ein Interesse an der Untersuchung von Schülervorstellungen. Da Lernen einen aktiven Prozeß darstellt, ist eine genaue Kenntnis der *Vorstellungen* der Schüler eine wichtige Voraussetzung für einen guten naturwissenschaftlichen Unterricht.

² Die erkenntnistheoretische Frage, ob bzw. inwieweit *Wissen* mit einer externen Realität korrespondiert, ist für die hier vorliegende Arbeit nicht relevant.

³ Der Begriff 'Paradigma' wurde von KUHN geprägt: Diese "Leistungen waren neuartig genug, um eine beständige Gruppe von Anhängern anzuziehen, die ihre Wissenschaft bisher auf andere Art betrieben hatten, und gleichzeitig war sie noch offen genug, um der neuen Gruppe von Fachleuten alle möglichen ungelösten Probleme zu stellen. Leistungen, mit diesen beiden Merkmalen werden ich von nun an als »Paradigmata« bezeichnen [...]" (KUHN, 1967, Seite 25).

If the move from "children's science" to "teachers' science" is to be accomplished by some means other than simple assertion that the student is wrong and the teacher is correct, it must involve some understanding of what the students have said, i.e. an understanding of their erroneous statements, so that corrections can extend on the basis of, and form, these erroneous views. [...] it is necessary to recognise that other linguistic usages, different from one's own, can have meaning; and this must be extrapolated to involve more than just acknowledging the possibility, to involve seriously endeavouring to work out other major meanings there might be, in the children's language-games.
(STENHOUSE, 1986)

In der Literatur werden viele Ausdrücke für 'Vorstellungen von Schülern' benutzt, deren Verwendung nicht einheitlich ist. GILBERT & WATTS (1983) beschreiben einige dieser Ausdrücke und die ihnen zugrundeliegenden theoretischen Hintergründe. So deutet der Ausdruck '*misconception*' beispielsweise an, daß es sich um einen isolierbaren Bestandteil eines statischen Systems handle, den es zu erkennen und zu eliminieren gelte. Im Ausdruck '*pre-concept*' schwingt mit, daß es sich um etwas naives, unreifes handle, was noch nicht weit genug entwickelt sei, um als '*concept*' bezeichnet zu werden. Andere Ausdrücke deuten hingegen an, daß die Vorstellungen der Schüler keine Mangelerscheinung sind, die aus schlechtem *Lernen* oder *Lehren* resultiert. Forscher, die Fehler von Lernenden als ein normales Phänomen bei der Entwicklung von *Vorstellungen* ansehen, verwenden demnach eher Ausdrücke wie '*children's-science*', '*theories in action*', '*alternative frameworks*' oder '*alternative conception*'. GILBERT & WATTS machen zur Vereinheitlichung der Terminologie folgenden Vorschlag:

Our proposal here is that 'conception' be used to focus the personalised theorising and hypothesising of individuals. [...] alternative frameworks can profitably be seen as generalised non-individual descriptions. That is, their relation to the data base is one level further removed than that of a category of response. They can be seen, then, as short summary descriptions ...
(GILBERT & WATTS, 1983)

Da sich dieser Vorschlag nicht durchgesetzt hat, werden in dieser Arbeit die Begriffe aus den kognitiven Lerntheorien verwendet, die zuvor definiert wurden. Dabei wird im wesentlichen von *Vorstellungen* und von *Annahmen* die

Rede sein. Dem liegt zugrunde, daß es, wenn man den Schüler so gut wie möglich verstehen will, nicht sinnvoll ist, bei der Analyse der Daten die Äußerungen der Schüler sofort mit den naturwissenschaftlich anerkannten Beschreibungen zu vergleichen. Ein solcher sofortiger Vergleich wäre beispielsweise bei der Beschreibung von 'Falschvorstellungen' (*'misconceptions'*) nötig. Außerdem wird diese Bezeichnung den Grundannahmen der vorliegenden Arbeit nicht gerecht. Der Autor sieht in den Äußerungen der Schüler das Resultat ihrer ernsthaften Auseinandersetzung mit dem diskutierten Thema. Es wird sich zeigen, daß auch falsche Äußerungen der Schüler oft sehr logisch sind und eine große Überzeugungskraft besitzen. Hier wird die Auffassung vertreten, daß die geäußerten Vorstellungen einen wichtigen Schritt beim Erlernen der Naturwissenschaften und häufig eine große intellektuelle Leistung darstellen. Eine Abwertung der Äußerungen als 'Falschvorstellungen' erscheint aus dieser Sicht unangemessen.

SCHMIDT (1997) geht von der Annahme aus, daß Schülervorstellungen auch dann logisch und in sich schlüssig sein können, wenn sie nicht mit den naturwissenschaftlich anerkannten Konstrukten übereinstimmen. Er sucht nach der logischen Verbindung zwischen den 'falschen' Vorstellungen der Schüler und den Informationen, die ihnen zur Verfügung stehen. Diese Verbindung bezeichnet er als "*pattern*".

This pattern is not a theory that is capable of describing all phenomena connected with misconceptions. It has, however, some predictive power as to which areas of chemistry might cause difficulties for students.

(SCHMIDT, 1997)

2.2 Bisherige Untersuchungen über Schülervorstellungen zur Elektrochemie

Die geringe Anzahl von Untersuchungen über Schülervorstellungen in der Elektrochemie ist auffällig, da ihr eine zentrale Rolle in den Lehrplänen vieler Länder zukommt. Außerdem stellt sie eines der komplexesten Themen der Schulchemie dar. GRIFFITHS (1994) kommentiert dies wie folgt:

The lack of attention which researchers have paid to students' misconceptions relating to electrochemistry is surprising in the light of comments by BUTTS & SMITH (1987 [a]) and FINLEY et al. (1982) that it is the most difficult topic encountered in School chemistry. (GRIFFITHS 1994)

GARNETT & TREAGUST (1992b) äußern sich ähnlich. Darüber hinaus vermuten sie, daß dieses Thema Lernenden beträchtliche Probleme bereiten könnte, da Grundkenntnisse über Redoxreaktionen notwendig sind, um elektrochemische Vorgänge zu verstehen.

GARNETT & TREAGUST (1992a; b) führten halbstrukturierte Interviews mit 32 Schülern eines australischen High School-Abschlußjahrganges durch. Diese hatten Elektrochemie zuvor im Unterricht behandelt und wurden von elf unterschiedlichen Lehrern unterrichtet, die jeweils drei Schüler mit unterschiedlichen Leistungsfähigkeiten aussuchten.

Die Autoren erstellten zunächst eine Liste mit Wissensaussagen, die ihnen zum Verständnis der Elektrochemie nötig erschienen. Dies geschah ausgehend von Schulbüchern und Erfahrungen der Autoren. Die Liste wurde anschließend von mehreren Professoren und Lehrern unabhängig voneinander überprüft und daraufhin überarbeitet. Ausgehend von dieser Liste wurde ein Interviewleitfaden entwickelt. Die darin abgedeckten Themen lassen sich in vier Bereiche unterteilen: elektrische Stromkreise, Redoxreaktionen, galvanische Zellen und Elektrolysezellen. Das Ergebnis der Untersuchung ist eine Liste von 39 "*misconceptions*", die von den Autoren 13 Kategorien zugeordnet wurden (Tabelle 1).

Elektrische Stromkreise

1. Ladungsgesetz
2. Elektrischer Strom
3. Potentialdifferenz und EMK⁴

⁴ *Elektromotorische Kraft*

Redoxreaktionen
4. Bestimmung der Oxidationszahlen
5. Identifizierung von Redoxgleichungen mit Hilfe von Oxidationszahlen
6. Identifizierung von Redoxgleichungen mit anderen Mitteln
7. Gegenseitige Abhängigkeit von Oxidation und Reduktion
Galvanische Zellen
8. Identifizierung der Anode und der Kathode in einer galvanischen Zelle
9. Notwendigkeit einer Standard-Halbzelle
10. Strom in einer galvanischen Zelle
11. Ladung von Anode und Kathode in einer galvanischen Zelle
Elektrolysezelle
12. Identifizierung der Anode und der Kathode in einer Elektrolysezelle
13. Vorhersage der Elektrolyseprodukte und der anzulegenden EMK

Tabelle 1: Kategorisierung der "*misconceptions*" von GARNETT & TREAGUST (1992a;b)

GARNETT, GARNETT & TREAGUST (1990) geben folgende Ursachen für die Probleme an, die Schüler mit der Elektrochemie haben: Die Aufteilung von Wissen in voneinander unabhängige Fächer (z. B. Chemie und Physik), unzureichendes Grundlagenwissen (z. B. Elektrizitätslehre), Interpretation der Fachsprache durch die Schüler (z. B. alltagssprachliche Deutung von Fachwörtern⁵), die Tatsache, daß in der Wissenschaftssprache Begriffsnamen in unterschiedlichen Bedeutungen benutzt werden (z. B. 'Oxidation' und 'Reduktion'⁵) und die Anwendung von auswendig gelernten Konzepten und Algorithmen ohne tieferes Verständnis (z. B. bei der Bilanzierung von Redoxgleichungen).

SANGER & GREENBOWE (1997a) haben die Studie von GARNETT & TREAGUST (1992b) repliziert. Sie führten Interviews mit 16 Studenten aus drei unterschiedlichen Chemie-Anfängerkursen einer amerikanischen Universität.

⁵ vgl. mit SCHMIDT (1997)

Sie benutzten den Interviewleitfaden von GARNETT & TREAGUST in leicht abgewandelter Form. Außerdem erweiterten sie ihn um Fragen zu Konzentrationszellen, die jedoch nur einem Teil der Probanden gestellt wurden. Die Autoren gelangten im wesentlichen zu den gleichen Ergebnissen wie GARNETT & TREAGUST und kategorisierten die gefundenen Konzepte auf die gleiche Weise. Darüber hinaus fanden sie 15 neue "*misconceptions*", von denen vier zum Thema 'Konzentrationszelle' gehören und in zwei neue Kategorien eingeteilt wurden (Tabelle 2).

- | |
|--|
| Konzentrationszelle |
| 14. Identifizierung der Anode und der Kathode in einer Konzentrationszelle |
| 15. Vorhersage der Reaktionsprodukte und der EMK der Konzentrationszelle |

Tabelle 2: Zusätzliche Kategorien von SANGER & GREENBOWE (1997a;b)

Die Autoren versuchten mit Hilfe von Computeranimationen die Anzahl von Studenten mit falschen Vorstellungen über Elektrochemie zu verringern (SANGER & GREENBOWE 1997b). Um die Wirkung ihrer Computeranimationen zu überprüfen, verglichen die Autoren quantitativ die Ergebnisse von schriftlichen Examensprüfungen ihrer Studenten mit den Ergebnissen, die OGUDE & BRADLEY (1994) veröffentlichten. Dabei war nicht gewährleistet, daß die Daten unter vergleichbaren Bedingungen erhoben wurden. Daher ist die Aussagekraft dieser Vergleichsgruppenuntersuchung höchst zweifelhaft.

OGUDE & BRADLEY (1994) identifizierten in einer Voruntersuchung, die aus Interviews und schriftlichen Tests bestand, vier Themen, die den Schülern besondere Schwierigkeiten bereiteten (Tabelle 3). Ausgehend von dieser Voruntersuchung wurden 20 Aufgaben entwickelt, die von 30 Schülern der zehnten Klasse und von 40 Studenten im ersten Studienjahr bearbeitet wurden.

- | |
|--|
| 1. Leitungsmechanismus im Elektrolyten |
| 2. elektrische Neutralität in den Zellen |
| 3. Elektrodenprozesse und die Bezeichnung der Elektroden |
| 4. einzelne Teile der Zellen, elektrischer Strom und EMK |

Tabelle 3: Themen, die Schülern Probleme bereiten (OGUDE & BRADLEY, 1994)

Es werden eine Reihe von falschen Vorstellungen beschrieben. Die Gültigkeit dieser Ergebnisse muß jedoch aus mehreren Gründen in Frage gestellt werden. So enthalten einige Aufgaben komplizierte oder mißverständliche Zeichnungen. Mehrere Aufgaben bestehen darin, daß der Schüler entscheiden muß, ob eine Aussage 'richtig' oder 'falsch' ist. Bei einer solchen Aufgabenstellung ist es wahrscheinlich, daß ein großer Teil der gegebenen Antworten geraten sind. Desweiteren geht aus dem Artikel nicht deutlich genug hervor, wie die von den Autoren gezogenen Schlußfolgerungen mit den von ihnen erhobenen Daten zusammenhängen.

Eine der in dieser Untersuchung verwendeten Aufgaben wurde bei der *25th National Youth Science Olympiad in South Africa (1989)* von 6900 Schülern bearbeitet. Dabei gaben 34% der Schüler an, daß die Leitfähigkeit des Elektrolyten in einer elektrochemischen Zelle auf die Bewegung von Elektronen durch die Lösung von einer Elektrode zur anderen zurückzuführen sei.

OGUDE & BRADLEY (1996) führten Einzel- und Gruppeninterviews mit Schülern und Studenten durch. Der Artikel enthält keine Angaben über die Zusammensetzung der Gruppen bei den Gruppeninterviews. Auch die Interviewmethode wird weder für die Einzel- noch für die Gruppeninterviews beschrieben. Eine Beschreibung des Hintergrundes fehlt. Aufgrund der Darstellung in dem vorliegenden Artikel ist eine Bewertung dieser Untersuchung nicht möglich.

BARRAL, FERNANDEZ & OTERO (1992) versuchten, Schülervorstellungen im Rahmen einer experimentell ausgerichteten Unterrichtseinheit zu untersuchen.

Nachdem der Aufbau von Metallen⁶ mit einer Klasse von 29 Schülern im Alter von 15 bis 16 Jahren besprochen wurde, führten die Schüler eine Reihe einfacher Experimente durch. Zuerst wurde Zink in verdünnte Salzsäure gegeben und die Gasentwicklung beim Auflösen des Metalls beobachtet. Der Lehrer

identifizierte das Gas als Wasserstoff und beschrieb das Phänomen im Sinne einer Redoxreaktion. Als nächstes wurde Kupfer in dieselbe verdünnte Salzsäure gegeben und beobachtet, daß dabei kein Gas entstand. Zum Schluß wurden die Schüler angewiesen, ein Stück Kupferdraht mit einer Zinkstange zu verbinden und jeweils das Ende der Stange und des Drahtes in die verdünnte Säure zu tauchen (woraufhin sich an beiden Enden Gasbläschen entwickelten). Der Lehrer gab hierzu keinerlei Erklärung ab und erteilte sofort die folgende Aufgabe: 'Schreibe auf, was du beobachtet hast und versuche zu begründen, warum das passiert, was du gesehen hast!'

Diese Fragetechnik stellt den Versuch dar, Schülervorstellungen im Zusammenhang mit der Laborarbeit der Schüler zu erforschen. Die Autoren beschreiben, wie die Schüler versuchen, die gestellte Aufgabe zu lösen. Ob dabei wirklich Schülervorstellungen untersucht werden, bleibt fraglich. Der Ansatz stellt jedoch eine interessante Möglichkeit dar, die Elektrochemie im Unterricht einzuführen.

BUTTS & SMITH (1987a) haben untersucht, welche Themen des Lehrplans von Schülern und von Lehrern als besonders schwierig empfunden werden. Dazu haben sie 266 Schüler der zwölften Klasse aus zehn unterschiedlichen Schulen in Australien schriftlich befragt. Den Schülern, die zum Zeitpunkt der Befragung den gesamten Lehrplan durchlaufen hatten, wurden fünfzig Konzepte vorgelegt, die sie als "*easy*", "*difficult at first*", "*very difficult*", "*extremely difficult*" oder "*not studied*" kategorisieren sollten. Außerdem wurden den 15 Lehrern dieser Schüler die gleichen Konzepte vorgelegt. Sie wurden gebeten, diese nach dem von ihnen erwarteten Schwierigkeitsgrad für ihre Schüler zu kategorisieren. Tabelle 4 gibt die für die Elektrochemie relevanten Konzepte wieder, die von den meisten der befragten Schülern als besonders schwierig erachtet wurden.

⁶ Es wurde das Lorentz' Modell von 1912 verwendet. Demnach sind Metalle eine geordnete Ansammlung von kugelförmigen Kationen mit frei beweglichen Elektronen in den Zwischenräumen.

"The connection between CELL VOLTAGE and the relative strength of OXIDANT and REDUCTANT."
"The difference in properties between IONIC COMPOUNDS and MOLECULAR COMPOUNDS."
"The difference between ELECTROLYTES and NON-ELECTROLYTES (in terms of the presence of ions and molecules.)"

Tabelle 4: Von Schülern als besonders schwierig erachtete Konzepte der Schulchemie, die mit Elektrochemie zu tun haben (BUTTS & SMITH, 1987a).

BUTTS & SMITH (1987b) haben drei der nach BUTTS & SMITH (1987a) als sehr schwierig geltenden Konzepte ausgesucht, die ihrer Meinung nach für das Verstehen der Chemie besonders wichtig sind. Darunter sind die beiden letzten Konzepte aus Tabelle 4. Zu diesen Themen führten sie Interviews mit Schülern durch, die diese Konzepte in der vorangegangenen Untersuchung (BUTTS & SMITH 1987a) als "*very difficult*", oder als "*extremely difficult*" bewertet hatten. Insgesamt handelte es sich um 28 Interviews mit Schülern aus zehn Schulen. Es sollten die Vorstellungen der Schüler über die Struktur von Festkörpern, die Vorgänge beim Auflösen von Substanzen (Salz und Zucker) in Wasser, den Mechanismus der elektrischen Leitung in Elektrolyten, und über die Vorgänge bei einer Fällungsreaktion untersucht werden.

SUMFLETH (1992) legte Schülern der Jahrgangsstufen 6 bis 13 folgende Aufgabe vor:

Ein Eisennagel wird in eine Kupfersulfatlösung getaucht. Nach einiger Zeit befindet sich auf ihm ein kupferfarbener Überzug. Erklären Sie diese Beobachtung!
(SUMFLETH, 1992)

Die Autorin stellt fest, daß viele Schüler selbst nach Abschluß des Kursthemas Elektrochemie in der Sekundarstufe II die Aufgabe nicht richtig lösen können. Ihr scheint es, daß die Schüler die Vorstellung von einer chemische Reaktion nicht benötigen, da die Feststellung, daß sich irgend etwas aus der Lösung an dem Nagel absetzt, die Vorgänge ausreichend erklärt. Es ist jedoch fraglich, ob diese Schüler wirklich davon ausgehen, daß keine chemische Reaktion stattfindet oder ob sie lediglich der Meinung sind, daß die von ihnen getroffene Aussage die gestellte Frage hinreichend beantwortet. Es wird schließlich nicht

nach einer chemischen Reaktion gefragt und die Feststellung, daß sich etwas aus der Lösung am Nagel absetzt, enthält keine Angaben darüber, ob eine Reaktion stattfindet oder nicht. So wird ein Schüler wie folgt zitiert:

"Kupfer löst sich von dem Sulfat und lagert sich am Eisen an. Dies geschieht, da Eisen einfach positiv und Kupfer einfach negativ ist."
(SUMFLETH, 1992)

Wenn man unterstellt, daß der Schüler sich einer korrekten Wissenschaftssprache bedient, so läßt sich aus dem ersten Teil dieser Antwort schließen, daß keine chemische Reaktion stattfindet. Was die von den Schülern verwendete Sprache betrifft, so vermutet die Autorin jedoch, daß "fachwissenschaftliche Begriffe [...] eher zufällig eingestreut" werden (SUMFLETH, 1992).

LEE & FENSHAM (1996) untersuchten, welche Strategien Schüler und Lehrer verwenden, um Aufgaben zur Elektrochemie zu lösen. Dazu wurden zehn Lehrern und 32 Schülern der zwölften Klasse drei Aufgaben vorgelegt. Sie wurden gebeten, ihre Gedanken während des Lösungsprozesses laut zu äußern. Aus den so gewonnenen Daten entwickelten die Autoren ein allgemeines Modell zur Beschreibung von Problemlösestrategien, das anschließend mit Modellen anderer Autoren verglichen wurde. Aussagen, die sich speziell auf die Elektrochemie beziehen, enthält das Modell von LEE & FENSHAM nicht.

MAROHN (1999) entwickelte Mehrfachwahlaufgaben und Aufgaben mit offener Antwortmöglichkeit zum Thema Elektrochemie, um "Falschvorstellungen zu erforschen, die das Verständnis der Vorgänge in elektrochemischen Zellen erschweren und die Kommunikation zwischen Lehrer und Schüler im Chemieunterricht behindern" (MAROHN, 1999). Diese Aufgaben wurden in mehreren Untersuchungszyklen von insgesamt 16000 Schülern aus deutschen Chemie-Grundkursen und -Leistungskursen bearbeitet.

Die Ergebnisse der Studie lassen sich fünf Kategorien zuordnen:

1. Elektrolyse: Viele Schüler sehen im Elektrolysevorgang eine Spaltung des Elektrolyten in Ionen. Aus ihrer Sicht liegen vor der Elektrolyse keine Ionen in den wäßrigen Lösungen vor. Einige

Schüler beschreiben nur die Aufspaltung des Elektrolyten in die Ionen und nicht die Elektronenübertragung an den Elektroden.

2. Ladungstransport im Elektrolyten: Die dominierende Vorstellung ist, daß der Stromfluß im Elektrolyten auf der Bewegung von Elektronen beruht. Es werden unterschiedliche Mechanismen beschrieben: Ein Fluß von freien Elektronen durch die Lösung, ein Transport von Elektronen mit Hilfe von Ionen, die sich durch die Lösung von einer Elektrode zur anderen bewegen und ein Weiterreichen der Elektronen von Ion zu Ion. Es wird beschrieben, daß die bei der Oxidationsreaktion freigesetzten Elektronen durch die Lösung zur anderen Elektrode gelangen, wo sie bei der Reduktionsreaktion wieder aufgenommen werden.

Eine besondere Schwierigkeit stellt die Richtung des Ladungstransportes in der galvanischen Zelle dar. Ausgehend von der Wechselwirkung zwischen elektrischen Ladungen nehmen viele Schüler an, daß sich negative Ionen auf den Pluspol und positive Ionen auf den Minuspol zu bewegen müssen.

3. Anode und Kathode: Es werden unterschiedliche Definitionen der Begriffe 'Anode' und 'Kathode' benutzt. Einige Schüler verstehen unter der 'Anode' immer den 'Pluspol' und unter der 'Kathode' immer den 'Minuspol'. Andere definieren die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' mit Hilfe der Begriffe 'Oxidation' und 'Reduktion' oder über den Elektronentransfer an den Elektroden, ohne Verwendung der Begriffe 'Oxidation' und 'Reduktion'. Es kommt auch vor, daß Schüler die Elektroden ausgehend von der Bewegungsrichtung von Ionen in der Lösung beschriften. Dabei wird davon ausgegangen, daß sich beispielsweise Kationen immer auf die Kathode zu bewegen. Ausgehend von der Auffassung, daß sich ungleichnamige Ladungen anziehen, schließen einige Schüler von der Ladung

der Ionen, die sich auf die Elektrode zu bewegen, direkt auf die Ladung der Elektrode. Sie schließen daraus auf eine Verknüpfung der Begriffe 'Anode', 'Kathode' und 'Minuspol', 'Pluspol'.

4. Minuspol und Pluspol: Die meisten Schüler schließen von den an der Elektrode stattfindenden Elektronenübergängen auf die Ladung der Elektrode.

Einige Schüler beschrifteten die Elektroden der Elektrolysezelle nicht richtig mit 'Minuspol' und 'Pluspol', obwohl die Polung der Spannungsquelle in der Aufgabe vorgegeben ist.

5. Stromverbrauch und Elektronenumsatz: Hier findet sich im wesentlichen die aus der Physikdidaktik bekannte Stromverbrauchsvorstellung wieder. Es gibt aber auch Schüler, die davon ausgehen, daß die bei der Oxidationsreaktion abgegebenen Elektronen zu einer Zunahme der Stromstärke führen oder daß die Stromstärke mit dem Elektronenumsatz in den vorgegebenen Reaktionsgleichungen korrespondiert.

Die Vorgänge in den elektrochemischen Zellen wurden von den Schülern aus unterschiedlichen Perspektiven beschrieben. Die Definition der 'Reduktion' als 'Elektronenaufnahme' und der 'Oxidation' als 'Elektronenabgabe' erwies sich als nicht eindeutig, da die Begriffe 'Aufnahme' und 'Abgabe' sowohl aus Sicht der Teilchen als auch aus Sicht der Elektrode⁷ gedeutet werden können. Man kann die oben genannte Definition auch so verstehen, daß bei der Oxidation Elektronen von der Elektrode an positiv geladene Ionen abgegeben werden. Die meisten Schüler identifizierten den Minuspol und den Pluspol, indem sie von den bei Stromfluß stattfindenden Elektronenübergängen auf die Ladung der jeweiligen Elektrode schlossen. Auch das kann ausgehend von unterschiedlichen Perspektiven erfolgen: Es kann der Elektronentransfer zwischen Elektrode und innerem bzw. äußerem Stromkreis betrachtet werden. Außerdem kann der

⁷ Unter 'Elektrode' wird hier die elektronenleitende Phase verstanden.

Elektronentransfer zum einen als Ursache für die Ladung der Elektrode und zum anderen als Folge der Ladung der Elektrode angesehen werden.

Da bei der Untersuchung von MAROHN jedem Schüler nur eine Frage gestellt wurde, konnte nicht festgestellt werden, ob einzelne Schüler zwischen den Perspektiven wechseln.

Eine weitere Frage, die die Studie offenläßt, besteht darin, ob die Schüler eine einmal gewählte Perspektive konsequent sowohl auf galvanische Elemente als auch auf Elektrolysezellen anwenden, oder ob sie die Perspektive von Fall zu Fall wechseln. Es wäre interessant zu untersuchen, ob und an welcher Stelle die Schüler in ihrer Argumentation möglicherweise auf Widersprüche stoßen.

(MAROHN, 1999, Seite 161)

MAROHN führte eine Schulbuchanalyse durch, um herauszufinden, wie die Begriffe 'Kathode'/'Anode', 'Pluspol'/'Minuspol' und 'Elektrode' in Büchern, die an deutschen Schulen oft Verwendung finden, eingeführt werden (Tabelle 5). Zu diesem Zweck wurde der Text einiger Schulbücher, die in hoher Auflage erschienen sind, gescannt. Die so erhaltenen Computerdateien konnten nach Begriffen durchsucht werden. So war es möglich, jede Textstelle der Bücher zu finden, in denen ein bestimmter Begriff vorkommt.

Die von MAROHN untersuchten Schulbücher sind:

- "Chemie heute - Sekundarbereich I" (JÄCKEL UND RISCH 1993)
- "Chemie heute - Sekundarbereich II" (JÄCKEL UND RISCH 1988)
- "Elemente Chemie I" (EISNER ET. AL. 1994)
- "Elemente Chemie II" (AMANN ET. AL. 1989)

(MAROHN, 1999, Seite 18)

Bei der Untersuchung der Verwendung der Begriffe 'Pluspol'/'Minuspol' berücksichtigte MAROHN außerdem das Physik-Schulbuch "Physik, Sekundarbereich I" von DORN und BADER aus dem Jahre 1993.

<p>Der Begriff 'Elektrode' bezieht sich in allen Schulbüchern auf die elektronenleitende Phase.</p>
<p>Drei der untersuchten Schulbücher verwenden die Begriffe 'Kathode'/'Anode' <u>nur</u> im Zusammenhang mit Elektrolysezellen, die Bezeichnungen 'Minuspol' und 'Pluspol' werden hingegen sowohl bei Elektrolysezellen als auch bei galvanischen Zellen benutzt. Das birgt die Gefahr, daß vom Leser die Kathode grundsätzlich mit dem Minuspol und die Anode mit dem Pluspol gleichgesetzt wird.</p> <p>Die Begriffe 'Kationen' und 'Kathode' werden in einem Buch über die Bewegungsrichtung der Ionen miteinander verknüpft.</p> <p>Nur in einem der genannten Bücher werden die Begriffe 'Anode'/'Kathode' unter Verwendung der Begriffe 'Oxidation' und 'Reduktion' definiert. In diesem Buch werden die Begriffe 'Anode'/'Kathode' auch für galvanische Zellen verwendet.</p> <p>Auf das Problem, daß die Begriffspaare 'Anode'/'Kathode' und 'Minuspol'/'Pluspol' bei galvanischen Zellen in anderer Weise miteinander verknüpft sind als bei Elektrolysezellen, wird in keinem der Bücher hingewiesen.</p>
<p>Das Physik-Schulbuch führt den Begriff 'Pol' bei elektrischen Stromkreisen als "Anschlüsse einer Stromquelle" ein. Der 'Minuspol' ist derjenige Pol, an dem ein "Elektronenüberschuß" bzw. eine "negative Ladung" herrscht, der 'Pluspol' der Pol, an dem ein "Elektronenmangel" bzw. eine "positive Ladung" herrscht.</p> <p>Die Chemieschulbücher enthalten keine Definition der Begriffe. Die Texte einiger Bücher legen jedoch eine Gleichsetzung mit den Begriffen 'Kathode' bzw. 'Anode' nahe.</p> <p>Ein Chemiebuch verknüpft den Begriff 'Minuspol' mit den Begriffen 'Elektronenüberschuß', den Begriff 'Pluspol' mit 'Elektronenmangel'.</p> <p>Alle Chemiebücher verbinden die Begriffe 'Elektronenabgabe' und 'Minuspol', sowie die Begriffe 'Elektronenaufnahme' und 'Pluspol' miteinander.</p>

Tabelle 5: Verwendung von Begriffen in Schulbüchern (Zusammenfassung der Ergebnisse von MAROHN, 1999, Seiten 89ff, 114ff)

2.3 Schülervorstellungen zur Elektrizitätslehre

Zum Verständnis der Elektrochemie sind einige grundlegende Konzepte der Elektrizitätslehre nötig. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle ein Überblick über die Literatur zu Schülervorstellungen in der Elektrizitätslehre gegeben.

VON RHÖNECK (1986a) gibt eine Übersicht über unterschiedliche Umschreibungen der gefundenen Schülervorstellungen:

- das *Quelle- Verbraucher- Modell* (ANDERSSON, 1984),
- die Beschreibung als kausaler Zusammenhang zwischen Batterie und Lämpchen⁸,
- das *Ausguß- Modell* mit dem Lämpchen als 'Ausguß'⁹,
- das *Geben- Schema* mit gebenden und nehmenden Bausteinen¹⁰,
- die *Schülerenergiebetrachtung* (VON RHÖNECK & VÖLKER, 1984).

"All diesen Umschreibungen von Schülervorstellungen ist gemeinsam, daß die Prozesse im Stromkreis mit einem vorherrschenden Begriff - meist dem Strombegriff - erläutert werden, dem energetische Aspekte zuzuordnen sind" (VON RHÖNECK, 1986a).

TALLANT (1993) kommt aufgrund seiner Literaturübersicht zu dem Schluß, daß die in der Literatur beschriebenen Konzepte in zwei Kategorien unterteilt werden können:

- a) Die Vorstellung, daß Strom verbraucht wird
- b) Die Vorstellung, daß eine Batterie eine Quelle für einen konstanten Strom darstellt

Er gibt eine Liste von fünf Modellen zur Beschreibung des Stromflusses an:¹¹

1. Das *unipolare (unipolar) Modell*, bei dem nur von einem Anschluß der Batterie Strom abgegeben wird. Der Strom wird vollständig verbraucht.
2. Die Vorstellung von *zusammenstoßenden Strömen (clashing currents)*¹², bei dem der Strom beide Anschlüsse der Batterie verläßt und aufgebraucht wird.

⁸ TIBERGHEIN & DELACÔTE, 1976 beschrieben in VON RHÖNECK, 1986a

⁹ FREDETTE & LOCHHEAD, 1980 beschrieben in VON RHÖNECK, 1986a

¹⁰ MAICHLE, 1982 beschrieben in VON RHÖNECK, 1986a

¹¹ SHIPSTONE, 1984 zitiert in TALLANT, 1993

¹² OSBORNE, 1981 zitiert in TALLANT, 1993

3. Die Vorstellung einer *Schwächung (attenuation) des Stroms*, bei der der Strom im Stromkreis nur in eine Richtung fließt. Es verläßt jedoch mehr Strom die Batterie als am anderen Anschluß wieder ankommt. Bei einer Reihenschaltung identischer Lampen führt dieses Modell zu der Schlußfolgerung, daß die letzte Lampe, bei der der Strom zuletzt ankommt, am wenigsten davon abbekommt.
4. Die Vorstellung des *Teilens (sharing) von Strom*. Diese Vorstellung ist dem Modell der *Schwächung von Strom* sehr ähnlich. Hier wird jedoch davon ausgegangen, daß bei einer Reihenschaltung identischer Lampen der Strom gleichmäßig auf alle Lampen verteilt wird.
5. Die *wissenschaftliche (scientific) Vorstellung*, bei der der Strom nur in eine Richtung durch die Kabel fließt und nicht verbraucht wird.

BORGES & GILBERT (1999) haben Vorstellungen über die Natur des elektrischen Stroms untersucht. Sie führten dazu Interviews, die eine Sequenz aus Vorhersage, Beobachtung und Erklärung darstellten. An der Untersuchung nahmen brasilianische Schüler, Studenten einer technisch orientierten Hochschule, Lehrer, Ingenieure und Praktiker teil, die in ihrem Beruf mit Elektrizität zu tun haben. Die Praktiker erhielten nie formalen Unterricht zum Thema Elektrizitätslehre.

Es werden vier *mentale Modelle (mental models)* für die Elektrizität beschrieben:

1. *Elektrizität als Fluß (electricity as flow)*: Elektrizität wird als materielle Substanz angesehen, die von der Batterie zu den Elementen des Stromkreises fließt, wo sie verbraucht wird. Es werden keine unsichtbaren Dinge oder Mechanismen beschrieben.
2. *Elektrizität als gegenläufige Ströme (electricity as opposing currents)*: Zwei unterschiedliche Arten von Elektrizität fließen in entgegengesetzte Richtungen auf die Lampe zu, wo sie sich treffen und Licht erzeugen. Dabei wird Strom verbraucht.

3. *Elektrizität als sich bewegende Ladungen (electricity as moving charges)*: Elektronen bewegen sich unter dem Einfluß einer Potentialdifferenz. Es werden mechanische Modelle verwendet, um elektrischen Strom und elektrische Widerstände zu beschreiben. Dabei werden mikroskopische Prozesse beschrieben.
4. *Elektrizität als Feldphänomen (electricity as a field phenomenon)*: Es werden elektrische Felder oder elektrische Signale beschrieben, die sich über den Stromkreis ausbreiten. Damit wird begründet, warum Vorgänge in Stromkreisen schnell stattfinden und wie Veränderungen an einem Punkt des Stromkreises zu einem neuen stationären Zustand führen.

Die Literatur über Schülervorstellungen zur Elektrizitätslehre ist sehr umfangreich und führt zu vielen ähnlichen Ergebnissen. Daher sollen hier stellvertretend zwei Modelle genauer dargestellt werden: die *Schülerenergiebetrachtung* und das *Quelle-Verbraucher-Modell*.

Zuvor werden einige Schülervorstellungen beschrieben, die Bestandteile der *Schülerenergiebetrachtung* und des *Quelle-Verbraucher-Modells* sind. Die Auswahl dieser Vorstellungen erfolgt ausgehend von zwei Untersuchungen von VON RHÖNECK (1986a;b). Diese basieren auf schriftlichen Befragungen von 414 Zehntklässlern¹³ (VON RHÖNECK, 1986a) und auf Tests, die im Rahmen eines Förderkurses von zehn begabten Realschülern (Klasse 9) durchgeführt wurden (VON RHÖNECK, 1986b).

2.3.1 Schüler ziehen den Strombegriff dem Potentialbegriff vor

Der Strombegriff ist im allgemeinen der "dominierende Begriff" in der Elektrizitätslehre (VON RHÖNECK, 1986a). Er wird von Schülern und Lehrern "gegenüber dem Begriff der Potentialdifferenz" – der sehr viel abstrakter ist – "begünstigt" (CLOSSET, 1984). Auffällig ist, daß Techniker eher mit Potentialdif-

¹³ Dabei handelt es sich um schwedische, französische und deutsche Schüler.

ferenzen als mit Strömen argumentieren, und somit Fehlerquellen vermeiden, die aus einer lokalen Sichtweise hervorgehen (CLOSSET, 1984).

Zu diesem Schluß kommen auch STOCKLMAYER & TREAGUST (1996). Sie stellen fest, daß die Beschreibungen, die Lehrer ihren Schülern vermitteln, vom Strombegriff ausgehen. Dabei wird unter 'Strom' ein Fluß von geladenen Teilchen – normalerweise von Elektronen – verstanden.

In broad terms, the 'scientific view' presented to [...] students by teachers and lecturers is one of direct current being due to the flow of charged particles, usually electrons, under influence of a potential difference across the ends of a wire.

(STOCKLMAYER & TREAGUST, 1996)

STOCKLMAYER & TREAGUST (1996) haben eine Untersuchung mit Berufsschülern, Universitätsstudenten, Lehrern und Experten (Elektrikern, Elektrotechnikern und Dozenten für Ingenieurwissenschaften bzw. Physik) durchgeführt. Sie kamen zu dem Schluß, daß Beschreibungen, die von dem Strombegriff ausgehen, allgegenwärtig sind und auch von Lehrern bevorzugt werden. Die Experten ziehen jedoch das Feldkonzept vor.

The electron-transfer model is ubiquitous: it appears in all texts whether they be designed for physics or engineering students or for electricians.

Experts, however, do not retain this imagery. They regard electricity as a field-like phenomenon. [...] Their vocabulary deals with the task, the load, the job and the field – and they find the micro-view of electron transfer irrelevant and, at times, confusing.

(STOCKLMAYER & TREAGUST, 1996)

2.3.2 Stromverbrauchsvorstellung

Viele Schüler stellen sich vor, daß eine "Entwertung und Verminderung des Stroms durch ein Lämpchen oder einen Widerstand" stattfindet (VON RHÖNECK, 1986a). "Diese Stromverbrauchsvorstellung läßt sich physikalisch als Verbindung zwischen Strom- und Energievorstellung deuten" (VON RHÖNECK, 1986a), obgleich Energie nicht verbraucht, sondern nur von einer

Form in eine andere überführt wird. Die Vorstellung von Energieverbrauch wird jedoch häufig angetroffen¹⁴ (DUIT, 1986a; DUIT, 1986b, S.185).

Die Idee eines "Stromverbrauches längs des Stromkreises" (CLOSSET, 1984) findet sich auch bei Physikern wieder (CLOSSET, 1984), obwohl ihnen die Ladung als Erhaltungsgröße bekannt sein dürfte. Aus der Vermischung der Begriffe Strom und Energie folgt auch die Vorstellung von "*ruhenden*" Strömen in Batterien und Drähten. In einer Batterie ist ja Energie (= Strom) gespeichert.

2.3.3 Differenzierung von Spannung und Strom

Genau wie nicht ausreichend zwischen Strom und Energie unterschieden wird, werden auch die Begriffe Strom und Spannung nicht klar genug differenziert (VON RHÖNECK, 1986a).

Der Spannungsbegriff wird oft als "Attribut des dominierenden Strombegriffes" verstanden (VON RHÖNECK, 1988b). Ein Beispiel dafür ist die folgende Aussage: "Spannung ist die Kraft oder die Stärke des elektrischen Stroms" (VON RHÖNECK & VÖLKER, 1984). Ein Grund könnte sein, daß ein elektrischer Strom leichter vorstellbar ist als eine elektrische Spannung.

Aus der Literaturübersicht von TALLANT (1993) geht hervor, daß Schüler Probleme mit den Begriffen 'Strom', 'Energie', 'Leistung', 'Potentialdifferenz' und 'Spannung' haben¹⁵.

2.3.4 Die Bedingung $I = \text{konstant}$

Die Tatsache, daß in einer Reihenschaltung der Strom an jedem Punkt des Stromkreises gleich groß ist, stellt oft eine erhebliche Lernschwierigkeit da, weil sie mit der Stromverbrauchsvorstellung unvereinbar ist (VON RHÖNECK, 1986a).

¹⁴ z. B. in der Umgangssprache

¹⁵ MCDERMOTT & ZEE, 1984 zitiert in TALLANT, 1993

Es kommt aber auch vor, daß die Aussage "I = konstant fälschlicherweise auf den Batteriestrom bei sich änderndem Gesamtwiderstand ausgedehnt wird oder auch bei Parallelschaltungen zur Anwendung kommt" (VON RHÖNECK, 1986a).

2.3.5 Die lokale Argumentation

"Die intuitive Argumentation [ist] im wesentlichen lokaler Natur [und] dem Stromkreis folgend" (CLOSSET, 1984). "Die Ströme werden in den Verzweigungspunkten so aufgeteilt, als wüßte der Strom nicht, was anschließend im Stromkreis passiert" (VON RHÖNECK, 1986a). Vorgänge werden so beschrieben, als würde die "Batterie einen konstanten Strom liefern, dem im Laufe des Stromkreises 'Erlebnisse' zustoßen" (CLOSSET, 1984).

2.3.6 Die sequentielle Argumentation

Hier wird davon ausgegangen, daß ein Unterschied zwischen dem Strom, der in einen Teil eines Stromkreises hineinfließt und dem Strom, der hinausfließt, existiert (Stromverbrauchsvorstellung). Dabei besagt die "sequentielle Argumentation, daß eine Änderung 'vorne' im Stromkreis sich auf eine Änderung 'hinten' im Stromkreis auswirkt, während eine Änderung 'hinten' im Stromkreis sich nicht 'vorne' bemerkbar machen sollte, weil da 'der Strom schon vorbei ist'" (VON RHÖNECK, 1986a).

Wenn im Unterricht die Richtung des Stromflusses eingeführt wird, ist eine sequentielle Argumentation unausweichlich¹⁶ (TALLANT, 1993).

Die "sequentielle Argumentation setzt sich vor allem während der Einführung des Strombegriffes fest." Ihre "Auswirkungen können sich in bestimmten Fällen im Laufe der Schulzeit abschwächen, aber die Argumentation selbst verschwindet nicht: man findet sie in neuen Situationen wieder, die für den Studenten oder den Physiker weniger üblich sind" (CLOSSET, 1984). Daher sollte im Unterricht der "globale Charakter der elektrischen Phänomene bei den Stromkreisen betont werden" (CLOSSET, 1984).

¹⁶ VON RHÖNECK & GROB, 1987 zitiert in TALLANT, 1993

2.3.7 Der Widerstandsbegriff

Vor dem Unterricht existiert der Widerstandsbegriff oft nicht. An seine Stelle tritt ein Stromverbraucher (VON RHÖNECK & VÖLKER, 1984).

Bisweilen trifft man auch die Auffassung an, daß eine Vergrößerung des Widerstandes einen größeren Strom zur Folge hat (VON RHÖNECK, 1986a).

2.3.8 Leitungsmechanismus in Metallen

Metalle zeichnen sich dadurch aus, daß ein Teil der Elektronen über eine große Beweglichkeit verfügt. Daraus resultiert unter anderem ihre große elektrische Leitfähigkeit.

Einige Schüler versuchen, "ein Nichtleiten über das Fehlen von Elektronen" zu erklären und setzen damit den "Nichtleiter einem positiven Pol gleich." Analog dazu wird dann "im Leiter ein Überschuß an Elektronen postuliert" (VON RHÖNECK, 1988b).

2.3.9 Zwei Modelle zur Beschreibung von Schülervorstellungen

Mehrere der oben beschriebenen Vorstellungen können zusammen das Bezugssystem eines Schülers bilden. Die Schülerenergiebetrachtung und das Quelle-Verbraucher-Modell stellen den Versuch einer Beschreibung eines solchen Bezugssystems dar (VON RHÖNECK & VÖLKER, 1984).

2.3.9.1 Schülerenergiebetrachtung (VON RHÖNECK & VÖLKER, 1984)

VON RHÖNECK & VÖLKER (1984) beschreiben die *Schülerenergiebetrachtung* (Abbildung 1) und zeigen mit Testaufgaben, die sie französischen und deutschen Schülern unterschiedlicher Klassen und Schultypen vorlegten, daß ein großer Anteil der Schüler Aussagen macht, die dieser Beschreibung entsprechen.

Die Aussagen der *Schülerenergiebetrachtung* sind:

1. Es wird nicht ausreichend zwischen Elektronen- und Energiefluß unterschieden.
2. Elektrischer Strom kann in Batterien und Drähten gespeichert und in Geräten (z.B. Lampen) verbraucht werden.

3. Spannung wird als eine Eigenschaft des Stroms verstanden (z.B. als Kraft des Stroms).
4. Der Widerstandsbegriff fehlt (statt dessen Stromverbrauch).

Die wichtigsten Aussagen [...] werden im folgenden in einer grafischen Darstellung zusammengefaßt. Damit wird es möglich, Begriffsvernetzungen für eine Gruppe von Schülern sichtbar zu machen.

(VON RHÖNECK & VÖLKER, 1984)

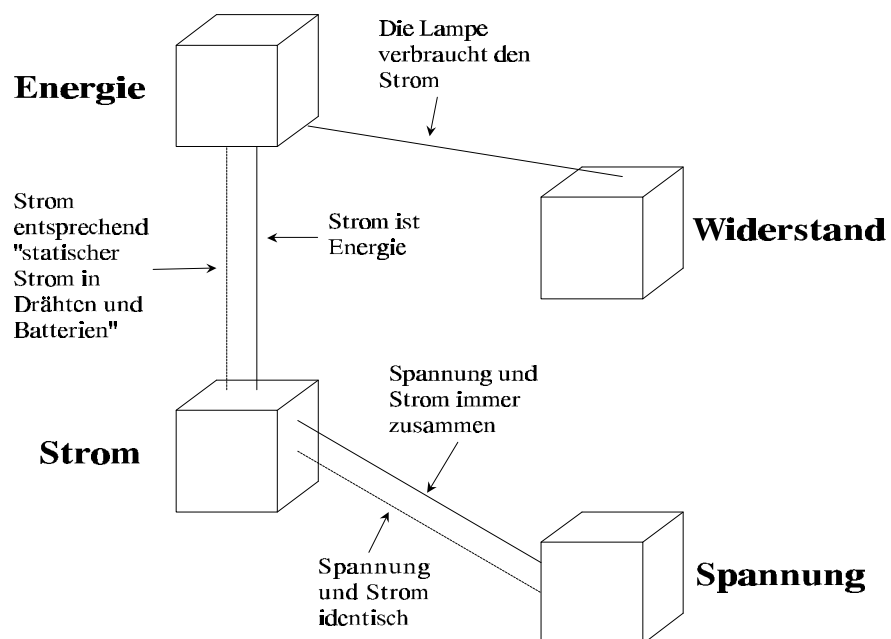


Abbildung 1: Aussagen, die mit der Schüler- Energiebetrachtung verträglich sind (nach VON RHÖNECK & VÖLKER, 1984).

2.3.9.2 Quelle-Verbraucher-Modell (ANDERSON, 1984)

ANDERSON (1984) beschreibt am Beispiel einfacher elektrischer Stromkreise, daß Vorstellungen, die Schüler aus dem Alltag mitbringen, sehr stabil sind und im Unterricht nicht leicht aufgegeben werden. Eine dieser Vorstellungen ist das *Quelle-Verbraucher-Modell* (s. Abbildung 2), nach dem " 'Elektrizität' oder 'Strom' von einer Quelle in einer Richtung zu einem konsumierenden System fließt und dort aufgebraucht wird" (ANDERSON). Diese Vorstellung ist im Alltag meistens ausreichend. Mit ihr läßt sich beispielsweise erklären, daß man **ein** Kabel eines Staubsaugers in eine Steckdose stecken muß, damit dieser funktioniert. Auch in der Alltagssprache finden sich entsprechende Vorstellungen wieder ('Stromverbrauch').

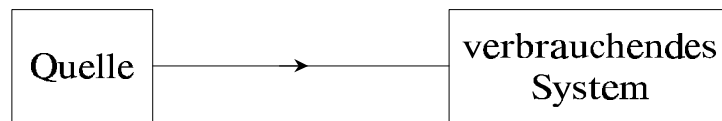


Abbildung 2: Ein Quelle-Verbraucher-Modell einfacher Stromkreise (ANDERSSON, 1984)

ANDERSON führte eine Untersuchung mit 550 schwedischen Schülern der Klassen sechs bis neun durch. Dabei zeigte sich, daß ein großer Teil der Schüler gemäß des *Quelle-Verbraucher-Modells* argumentierte.

Nach diesem Modell ist nur eine Verbindung zwischen der Quelle (z. B. Batterie) und dem Verbraucher (z. B. Lampe) notwendig. Stellen die Schüler fest, daß zwei Verbindungen benötigt werden, erklären sie sich das oft damit, daß 'unverbrauchte' Energie bzw. 'unverbrauchter' Strom durch die zweite Verbindung zurückfließt (teilweiser Stromverbrauch). Oder sie sind der Meinung, daß durch beide Kabel Energie bzw. Strom zum Verbraucher fließt. Dabei wird nicht unbedingt zwischen den Begriffsnamen 'Strom' und 'Energie' unterschieden.

3 Ziele

In diesem Kapitel werden die Ziele der vorliegenden Studie aus dem Hintergrund (Kap. 2) abgeleitet und formuliert.

Das *Position paper* der *Division of Chemical Education* der *Federation of European Chemical Societies (FECS)* zur Chemiedidaktik gibt allgemeine Ziele für empirische Studien an:

Chemistry educators discuss ways to make education in chemistry effective and worthwhile for all. A well-founded knowledge base is essential for making sound decisions. This knowledge base can be provided by the empirical studies of chemical education.
(DE JONG ET. AL., 1998)

Das Anliegen der vorliegenden Arbeit ist somit, Informationen für den Chemieunterricht zu sammeln. Die weitere Eingrenzung der Ziele bis hin zu den Forschungsfragen ergibt sich aus dem in Kapitel 2 beschriebenen Hintergrund.

Es gehört zu den Grundannahmen dieser Arbeit, daß das Vorwissen des Lernenden seine Wahrnehmung und somit den Lehr-Lern-Prozeß entscheidend beeinflusst. Daher kann eine gute Kenntnis von Schülervorstellungen für den Lehrer hilfreich sein.

Da *Lernen* ein aktiver Prozeß ist, werden Unterrichtsgegenstände benötigt, die den Schülern helfen, sich die zu lernenden Inhalte zu erarbeiten. Anders ausgedrückt: Lehrer brauchen adäquate Unterrichtsgegenstände für jedes zu unterrichtende Thema, in denen die Schüler interessante Probleme entdecken. Diese Probleme bringen die Schüler zum Nachdenken und zum Diskutieren. Sie helfen ihnen beim *Lernen*. Um solche Unterrichtsgegenstände zu finden und das genaue Vorgehen zu planen, ist eine gute Kenntnis der Schülervorstellungen und deren Vernetzung hilfreich.

Faßt man naturwissenschaftlichen Unterricht als Initiationsprozeß auf (s. Kap. 2.1), ergibt sich eine weitere Anforderung an die Unterrichtsgegenstände. Sie müssen den Schülern helfen, die *Konzepte* und die *Sprache* der Wissenschaftler zu verstehen. Dazu braucht der Lehrer gute Kenntnisse der wissenschaftlichen *Konzepte*. Es sollte für die im Unterricht zu erwartenden Probleme Lösungen

geben, die zum einen für die Schüler erreichbar sind und zum anderen zu einem besseren Verständnis der wissenschaftlichen *Konzepte* beitragen.

Aus den oben genannten Gründen sollen in der vorliegenden Arbeit Informationen gesammelt werden, die zum Erreichen der folgenden übergeordneten Ziele¹⁷ notwendig sind:

- Es sollen gewinnbringende Unterrichtsgegenstände für das Thema Elektrochemie identifiziert werden. Dazu soll festgestellt werden, wo Schüler Probleme mit den grundlegenden *Konzepten* der Elektrochemie haben,
- diese Probleme und ihre Ursachen sollen möglichst genau beschrieben
- und wenn möglich sollen Lösungsvorschläge gemacht werden.

Um neue Informationen zu gewinnen, wird eine empirische Untersuchung durchgeführt. Das ist notwendig, da in den bisherigen Studien über Schülervorstellungen zur Elektrochemie nur einzelne 'Falschvorstellungen' (*'misconceptions'*) isoliert voneinander untersucht wurden. Daher lassen diese Untersuchungen keine gesicherten Aussagen über die Verknüpfung der einzelnen Vorstellungen miteinander zu.

In der vorliegenden Arbeit soll die Vernetzung der einzelnen *Vorstellungen* über Elektrochemie untersucht werden. Dabei wird zunächst nicht zwischen 'richtigen' und 'falschen' *Vorstellungen* unterschieden, um eine möglichst unvoreingenommene Auseinandersetzung mit den Aussagen der Schüler zu gewährleisten.

¹⁷ Unter übergeordneten Zielen werden hier solche Ziele verstanden, die durch die vorliegende Arbeit nicht oder nur teilweise erreicht werden, zu deren Erreichen die durch sie gewonnenen Informationen jedoch beitragen können.

Die Forschungsfragen können wie folgt formuliert werden:

- Welche *Vorstellungen* haben Schüler zur Elektrochemie?
- In welchem Zusammenhang stehen die einzelnen Schülervorstellungen über Elektrochemie zueinander?
- Lassen sich Hierarchien erkennen? Leiten sich einige *Vorstellungen* aus anderen ab?¹⁸
- Die durch die vorliegende Untersuchung erhaltenen Ergebnisse sollen mit den Ergebnissen anderer Forscher verglichen werden. Da diese Untersuchungen auf anderen Methoden basieren und die Interpretation der Daten durch andere Forscher vorgenommen wurde, können die Ergebnisse so einer *Triangulation*¹⁹ unterzogen werden.

¹⁸ Ist das der Fall, werden die grundlegenden *Vorstellungen* als *Annahmen* bezeichnet.

¹⁹ Die "Qualität der Forschung" kann "durch Verbindung mehrerer Analysegänge vergrößert werden [...] Denzin hat das auf mehreren Ebenen festgemacht: verschiedene Datenquellen können herangezogen werden, unterschiedliche Interpreten, Theorieansätze oder Methoden. Triangulation meint immer, daß man versucht, für die Fragestellung unterschiedliche Lösungswege zu entwerfen und die Ergebnisse zu vergleichen. Ziel der Triangulation ist dabei nie, eine völlige Übereinstimmung zu erreichen" (MAYRING, 1996, Seite 121).

4 Methode

In diesem Kapitel werden die in der empirischen Untersuchung verwendeten Methoden zur Datenerhebung, Datenaufbereitung und Datenauswertung beschrieben. Zunächst werden die Rahmenbedingungen, die sich im *Untersuchungsplan* widerspiegeln, formuliert. Dabei zeigt sich, wie das Vorgehen durch die Forschungsfragen (s. Kap. 3) gelenkt wird.

4.1 Untersuchungsplan

Der *Untersuchungsplan* ('*design*') beschreibt, wie die Untersuchung angelegt ist. Er "umfaßt auf formaler Ebene Untersuchungsziel und -ablauf" und wird von den "konkreten Untersuchungsverfahren [...], also" den "Methoden der Datenerhebung, Datenaufbereitung und Auswertung" unterschieden (MAYRING, 1996, Seite 27). Im *Untersuchungsplan* werden die Rahmenbedingungen und Regeln für die Kommunikation zwischen Forscher und Beforschten festgelegt (MAYRING, 1996).

Ziel der vorliegenden empirischen Untersuchung ist es, die *Vorstellungen* von Schülern zur Elektrochemie und deren Verknüpfungen untereinander zu untersuchen. Darüber hinaus soll festgestellt werden, welche Probleme die Schüler mit den grundlegenden *Konzepten* der Elektrochemie haben. Dazu ist eine längere Auseinandersetzung mit einzelnen Schülern notwendig, die sich bereits vorher mit Elektrochemie beschäftigt haben. Die Schüler brauchen Zeit, um sich in das Thema einzudenken und um ihre Vorstellungen zu artikulieren. Alle Aussagen sollten von den Schülern begründet und gegebenenfalls überdacht werden. Der Forschungsansatz sollte offen genug sein, um ihnen Gelegenheit zu geben, über Punkte zu sprechen, die für sie interessant sind oder die sie als problematisch empfinden. Dennoch sollte die Interaktion mit den Schülern so strukturiert werden, daß das Thema Elektrochemie im Mittelpunkt steht. Da nicht zu erwarten ist, daß den Schülern schon vor Beginn der Interaktion mit dem Forscher bewußt ist, wo ihre Probleme beim Verstehen der Elektrochemie liegen, muß eine weitere Anforderung gestellt werden. Die Interaktion mit den Beforschten sollte so strukturiert sein, daß die Schüler Gelegenheit haben, sich

mit vielen grundsätzlichen *Konzepten* der Elektrochemie auseinanderzusetzen und auftretende Probleme möglichst selbst zu erkennen.

Die oben genannten Anforderungen können mit Einzelinterviews erfüllt werden. Es reicht aus, jeden Schüler einmal zu interviewen. Da die Schüler Zeit zum Nachdenken benötigen, sind lange Interviews erforderlich, in denen nicht einfach ein Katalog von vorformulierten Fragen abgearbeitet wird. Es ist ein Gespräch notwendig, in dem der Interviewer den Schüler beim artikulieren seiner Gedanken unterstützt. Der Schüler sollte dazu ermuntert werden, seine Aussagen immer wieder miteinander zu vergleichen und zu überdenken. Dabei sollten alle Aussagen so gut wie möglich begründet werden. Das Vorgehen in den Interviews wird in dem Sinne zyklisch sein, daß ein Thema solange immer wieder aus unterschiedlichen Richtungen betrachtet wird, bis der Schüler entweder mit seinen Aussagen zufrieden ist oder bis keine Weiterentwicklung im Gespräch mehr zu erkennen ist.

Bei der Analyse der Daten muß herausgearbeitet werden, welche *Vorstellungen* auftreten und wie sie von den Schülern begründet werden. Ziel der Analyse ist es daher, die Argumentationsstränge der Interviews herauszudestillieren.

Die zu erwartenden Ergebnisse sind Schülervorstellungen und -probleme, die sich aus der Struktur der Elektrochemie ergeben. Sie sind daher argumentativ verallgemeinerbar²⁰. Die Untersuchung einer großen Stichprobe von Schülern ist dafür weder nötig noch hilfreich. Es werden dennoch mehrere Schüler interviewt, um eine gewisse Vielfalt von Schülerargumentationen zu erreichen. Da-

²⁰ "Bei der Verallgemeinerung der Ergebnisse humanwissenschaftlicher Forschung muß explizit, argumentativ abgesichert begründet werden, welche Ergebnisse auf welche Situationen, Bereiche, Zeiten hin generalisiert werden können" (MAYRING, 1996, Seite 23). KVALE (1996) spricht in diesem Zusammenhang von "*Reader Generalization*". Er illustriert sie mit der folgenden Analogie: "For the legal and the clinical cases [...], it is the judge or the clinician who makes judgement of whether a previous case was sufficiently analogous to be used as a precedent for the present case. In both instances it is paramount that sufficient evidence is provided by the researcher for the analytic generalizations to be made" (KVALE, 1996, Seite 234). EYBE & SCHMIDT (im Druck a) greifen diese Gedanken auf und fassen sie unter dem Begriff "*interpretation by logical inference*" als Qualitätskriterium für qualitative Forschung zusammen.

bei werden Schüler aus unterschiedlichen Schulen befragt, um zu gewährleisten, daß die Ergebnisse nicht nur aus dem Unterrichtsstil eines Lehrers resultieren. Aus demselben Grund ist es sinnvoll, Interviews mit jeweils zwei Schülern aus einem Chemiekurs zu führen. Hier kann sich zeigen, inwieweit die Aussagen der Schüler unterschiedlich sind, obwohl sie den gleichen Chemiekurs besucht haben und welche Argumentationswege sich gleichen.

Die verwendeten Methoden werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

4.2 Planung und Durchführung der Interviews

4.2.1 Planung der Interviews

Die Wahl der Forschungsfragen, "also die Festlegung, was alles erhoben werden soll [...] – was im Einzelfall beobachtet oder befragt werden soll – sind Aufgaben *des Bestimmens* [...] Die Übersetzung der Objekt-Definition in Frage-Formulierungen ist dagegen eine Aufgabe *des Suchens*" (GUTJAHR, 1985, Seite 31). Die Forschungsfragen müssen in Interviewfragen übersetzt werden (GUTJAHR, 1985; KVALE, 1996). Dies stellt einen kreativen Prozeß dar und ist am besten im Team zu bewerkstelligen (GUTJAHR, 1985).

Abbildung 3 stellt den Ablauf der Planung der Interviews dar. Zunächst wurden die Forschungsfragen vom Autor in Interviewfragen übersetzt. Die Ergebnisse wurden dann mit zwei anderen Forschern diskutiert und überarbeitet. Mit dem so erhaltenen Interviewplan wurden in der Erprobungsphase zunächst zwei Probeinterviews mit Studenten durchgeführt. Die Tonaufzeichnungen wurden vom Interviewer und von einem weiteren Mitglied des Arbeitskreises angehört und bewertet. Es wurden zunächst Interviews mit Studenten des Lehramts Chemie im Grundstudium durchgeführt, da diese leichter erreichbar waren als Schüler. Zudem wurde angenommen, daß die Studenten sich besser artikulieren können als Schüler. Hierbei sollte festgestellt werden, ob die Struktur der Interviews prinzipiell zur Beantwortung der Forschungsfragen geeignet ist.

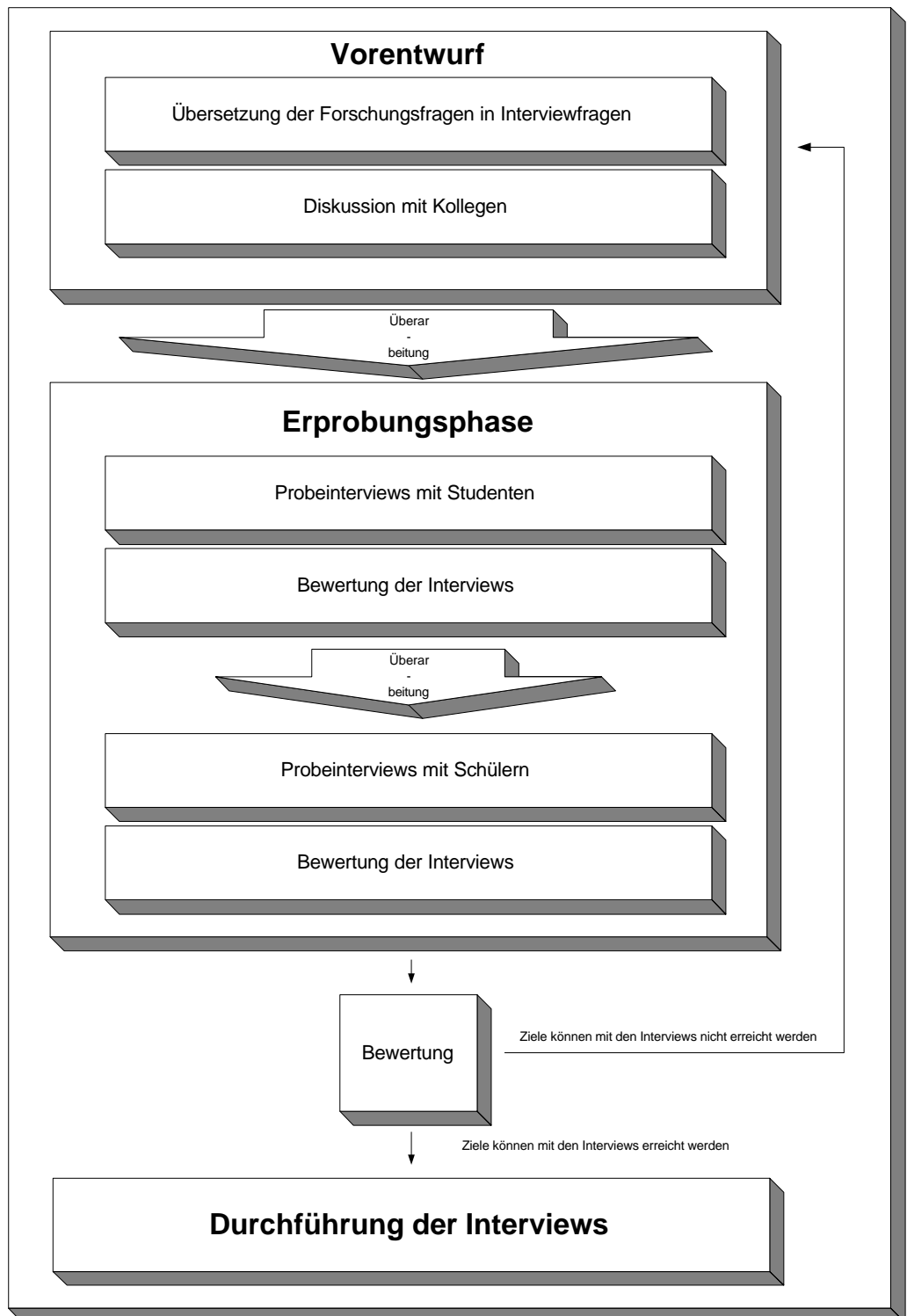


Abbildung 3: Planung der Interviews

Ausgehend von der Bewertung der Probeinterviews wurden die Interviewfragen überarbeitet. Mit dem neuen Interviewplan wurden zwei Probeinterviews mit Schülern durchgeführt. Auch diese wurden von zwei Forschern angehört und bewertet.

Die abschließende Bewertung der Erprobungsphase führte zu dem Schluß, daß die Interviews in der vorliegenden Form zur Beantwortung der Forschungsfragen geeignet sind. Somit war die Planung der Interviews abgeschlossen und die beiden Probeinterviews mit den Schülern wurden in das Datenmaterial für die abschließende Analyse aufgenommen.

Neben der Planung der Interviews diente die Erprobungsphase zum Training des Interviewers. Dessen Verhalten wurde nach jedem Interview bewertet und diskutiert. Auch unter diesem Gesichtspunkt wurde entschieden, daß die beiden Probeinterviews mit den Schülern für die weitere Analyse geeignet sind.

Auch in der anschließenden Phase der Datenerhebung wurden alle Interviews direkt im Anschluß an die Gespräche vom Interviewer bewertet, um gegebenenfalls Änderungen für die folgenden Interviews vorzunehmen. Bei dieser Voranalyse der Interviews standen folgende Fragen im Vordergrund:

- War das Verhalten des Interviewers angemessen? / Wie kann es verbessert werden?
- Können mit Hilfe der Interviews die Forschungsfragen beantwortet werden?
- Hat sich das Vorverständnis durch die bisherigen Interviews verändert? / Wenn ja: Was hat das für Konsequenzen für das nächste Interview?

Natürlich entwickelt sich das Verständnis des Forschers im Laufe eines solchen Prozesses stetig weiter. Im vorliegenden Fall war jedoch keine wesentliche Veränderung des Interviewplans notwendig. In Kapitel 5.8.1 findet sich ein Beispiel dafür, wie Erfahrungen aus der Voranalyse das Verhalten des Interviewers in einem der folgenden Interviews beeinflußt haben.

4.2.2 Die Interviewpartner

Insgesamt wurden elf Interviews mit Schülern durchgeführt. Eines dieser Interviews wurde nicht analysiert, da sich kein weiterer Schüler aus demselben Chemiekurs freiwillig für die Teilnahme an der Untersuchung meldete.

Für die Analyse wurden zehn Interviews verwendet. Die Interviewpartner waren vier weibliche und sechs männliche Schüler aus fünf verschiedenen Chemiekursen unterschiedlicher Schulen (s. Tabelle 6). Dabei handelte es sich um Schulen aus fünf Städten in Nordrhein-Westfalen. Es wurden zwei Schüler des zwölften und acht Schüler des dreizehnten Jahrganges der gymnasialen Oberstufe interviewt. Fünf der Schüler nahmen an einem Chemie Grundkurs und fünf an einem Chemie Leistungskurs teil²¹. Zwei Schüler aus jedem Kurs stellten sich freiwillig für die Interviews zur Verfügung. Alle Interviewpartner hatten zum Zeitpunkt des Interviews das Thema Elektrochemie bereits im Unterricht der Oberstufe behandelt²².

Ein Interview (S5) wurde im Verlauf der Analyse von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen (s. Kap. 5.8.1).

Kurs Nr.:	1	2	3	4	5
Schüler:	S1, S2	S3, S4	S5, S6	S7, S8	S9, S10

Tabelle 6: Zugehörigkeit der Schüler zu den Chemiekursen

4.2.3 Durchführung der Interviews

4.2.3.1 Der Interviewplan







Der Interviewplan (Tabelle 7) dient nur zur Orientierung des Interviewers, er enthält keinen Fragenkatalog, der im Interview abgearbeitet wird. Im Interviewplan sind Themen enthalten, die während des Interviews angesprochen werden sollen. Diese Themen müssen nicht in der angegebenen Reihenfolge im Interview vorkommen. Einige Fragen sind vorformuliert. Dies ist nur eine Hilfestellung für den Interviewer. Die Fragen werden meistens nicht in der vorliegenden Form verwendet.

²¹ Bei einem der Kurse handelte es sich um einen kombinierten Grund und Leistungskurs. Alle Schüler dieses Kurses hatten gemeinsam drei Schulstunden pro Woche Chemieunterricht. Den Teilnehmer des Leistungskurses wurden darüber hinaus noch weitere drei Wochenstunden Chemieunterricht zu einem anderen Themengebiet erteilt. Aus diesem Kurs wurde ein Teilnehmer des Grundkurses und ein Teilnehmer des Leistungskurses interviewt.



Briefing

Themen des Briefings:	
1.	Vorstellung
2.	Ziel der Untersuchung
3.	Tonbandaufnahme
4.	Zeitdauer des Interviews
5.	Gelegenheit für den Interviewee, Fragen zu stellen















Warming-Up

	Recorder anstellen (Beginn der Tonaufzeichnung)
	Ich möchte mit dir über Elektrochemie reden.
	Hast du dich schon mal mit dem Thema beschäftigt?
	Hat es dir Spaß gemacht?
	Woran kannst du dich besonders gut erinnern?
	Was war aus deiner Sicht besonders schwierig?

Überleitung vom Warming-Up zum Hauptteil

	Ich habe hier die Skizze eines Aufbaus, wie er in der Elektrochemie oft verwendet wird. Skizze ①
	Bitte beschreibe, was du siehst!

Hauptteil

Skizze ①		Was passiert in einer solchen Apparatur?
		Bitte erweitere die Skizze um Beschriftungen, die dir wichtig sind! Ich möchte wissen, wie du dabei vorgehst. Darum möchte ich dich bitten, dabei 'laut zu denken'.
		Was passiert an den Elektroden? oder: Was passiert an dieser Elektrode? Was an der anderen?
		Warum passiert das?
		Wie kommt der Strom durch die Lösungen?
		Wie hängt der Leitungsmechanismus mit den Vorgängen an den Elektroden zusammen?
		Das Schicksal eines Elektrons beschreiben!
Skizze ②		Ich habe hier noch eine andere Skizze.
		Bitte beschreibe den Aufbau!
		Was passiert in dieser Apparatur?
		Bitte erweitere die Skizze um Beschriftungen, die dir wichtig sind! (laut denken)
		Was passiert an den Elektroden?
		Warum passiert das?
		Das Schicksal eines Elektrons beschreiben!

²² Genauere Angaben können hier nicht gemacht werden, da sie einen Rückschluß auf die Identität einzelner Schüler zuließen.

Skizze ① & ②	●	Bitte vergleiche die beiden Skizzen!
	ⓕ	Wodurch unterscheiden sich die Aufbauten?
	●	Bitte vergleiche die Elektrodenreaktionen!
	ⓕ	Warum unterscheiden sie sich?
	●	Bitte vergleiche die Beschriftungen der beiden Zellen!
	ⓕ	Möchtest du Änderungen vornehmen?
	●	Bitte beschrifte die beiden Skizzen mit ... [noch fehlende Beschriftungen] (laut denken) Insgesamt sollen die folgenden Begriffe vorkommen: <ul style="list-style-type: none"> • Anionen/Kationen • Anode/Kathode • Elektronen • Minuspol/Pluspol • Richtung des Stromflusses • Oxidation/Reduktion
Skizze ②	●	Elektroden <u>und</u> Anschlußklemmen der Spannungsquelle mit ⊕ & ⊖ beschriften

Debriefing

●	Der Interviewer bittet den Interviewee, die benutzten Fachwörter (Anion / Kation, Anode / Kathode, Pluspol / Minuspol, Ionen ...) zu definieren.
ⓕ	Welche Fragen möchtest du einem Fachmann stellen, um Verständnisschwierigkeiten zu beseitigen?
-	Der Schüler kann Kommentare und Fragen loswerden ⊙ Ich habe keine weiteren Fragen. ⓕ Hast du Fragen oder möchtest du noch etwas sagen, bevor wir die Tonaufzeichnung beenden?
👉	Recorder abschalten (Ende der Tonaufzeichnung)
⊙	Damit ist das Interview beendet.
ⓕ	Möchtest du noch etwas loswerden? Oder hast Du noch Fragen? Der Rest der Zeit gehört dir.

Tabelle 7: Der Interviewplan²³

Die Interviews weisen ein grobe Gliederung auf (Abbildung 4), die sich auch in anderen Forschungsgebieten bewährt hat (GUTJAHR, 1996; KVALE, 1996). Die Phasen des Interviews werden nun im einzelnen beschrieben.

²³ Zeichenerklärung: 👉 Handlung, ⊙ Feststellung, ⓕ Frage, ● Aufforderung

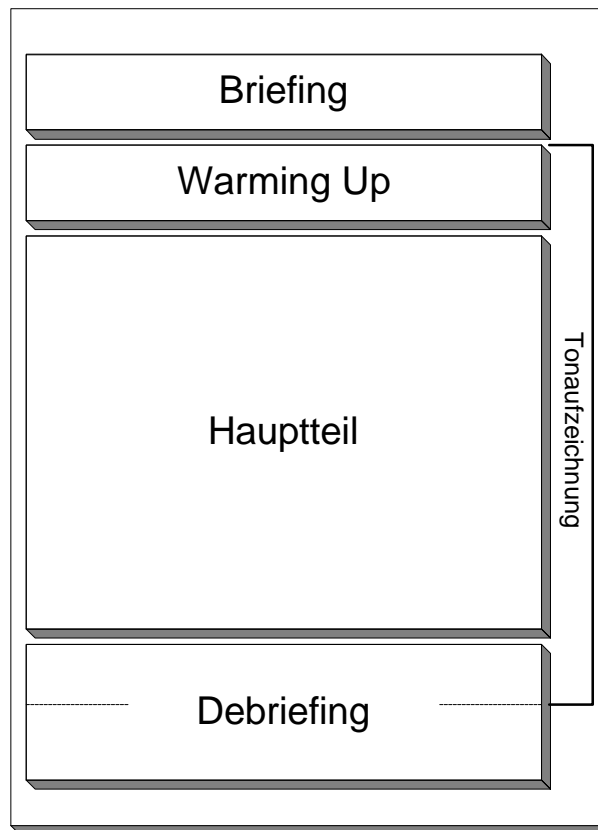


Abbildung 4: Zeitlicher Ablauf der Interviews

i) Briefing

Bevor das eigentliche Interview beginnen kann, müssen einige Dinge geklärt werden. Dieser Teil des Interviews wird nicht aufgenommen. Da sich Schüler und Interviewer im vorliegenden Fall vor dem Interview nicht kennen, muß sich der Interviewer zunächst vorstellen. Außerdem muß das Einverständnis des Beforschten zur freiwilligen Teilnahme an der Untersuchung eingeholt werden²⁴. Dazu muß dieser möglichst genau über die Ziele und die Methoden der Untersuchung informiert werden. Den Schülern wird versichert, daß sie das Recht haben, die Teilnahme an dem Interview zu verweigern oder es jederzeit abubrechen. So kann ein Konsens mit dem Beforschten erreicht werden²⁵. Um

²⁴ Da die Schüler, die an dieser Untersuchung teilnahmen, volljährig waren, war ein Einverständnis der Eltern nicht erforderlich.

²⁵ Dies geschieht aus ethischen Gründen. Die Befragten können nur dann wirklich entscheiden, ob eine Teilnahme in ihrem Interesse ist, wenn sie ausreichend über die Untersuchung informiert sind (BRICKHOUSE, 1992). "Informed consent entails informing the research (Fortsetzung auf der nächsten Seite)

sicherzustellen, daß der Schüler sich gegebenenfalls auch traut, von dem Recht auf Teilnahmeverweigerung Gebrauch zu machen, wird ihm versichert, daß der Lehrer vom Interviewer keinerlei Informationen über das Interview bekommt – auch dann nicht, wenn der Schüler nicht daran teilnimmt. Dieser Hinweis ist auch deshalb wichtig, weil der Befragte dazu ermutigt werden soll, offen über seine Probleme mit der Elektrochemie zu sprechen. Dazu muß der Schüler wissen, daß seine Äußerungen nicht an den Lehrer weitergegeben werden und daß sie sich somit auch nicht negativ auf seine Schulnoten auswirken können. Außerdem wird dem Schüler versichert, daß es auch dem Interviewer nicht um eine Leistungsbewertung geht, sondern daß er sich dafür interessiert, wie der Schüler über Chemie nachdenkt.

Außerdem wird ihm erklärt, daß der Interviewer während des Interviews keine Fragen, die das Thema des Interviews betreffen, beantworten wird und daß dieser auch keine Rückmeldung darüber gibt, ob eine Antwort richtig oder falsch ist. Daß aber nach dem Interview genügend Zeit sein wird, in der der Interviewer die Fragen des Schülers beantwortet.

Der Interviewer erklärt, daß das Interview aufgezeichnet wird. Es wird versichert, daß diese Aufzeichnung nicht an Dritte weitergegeben wird²⁶. Sie dient lediglich dazu, dem Interviewer bei der Analyse des Interviews zu helfen.

Der Schüler wird darüber informiert, daß das Gespräch mit Vor- und Nachbesprechung insgesamt 90 Minuten dauern wird.

Anschließend wird dem Schüler die Gelegenheit gegeben, Fragen zu stellen, bevor mit der Tonaufzeichnung begonnen wird.

subject about the overall purpose of the investigation and the main features of the design, as well as of any possible risks and benefits from participation in the research project. Informed consent further involves obtaining the voluntary participation of the subject, with his or her right to withdraw from the study at any time" (KVALE, 1996, Seite 112).

²⁶ Mit Ausnahme einiger Mitglieder des Arbeitskreises, in dem die vorliegende Arbeit entstanden ist.

Dieser Teil des Interviews nimmt nur wenige Minuten in Anspruch. Das ist auch deshalb wichtig, weil die meisten Schüler möglichst schnell mit dem Interview beginnen möchten. Sie empfinden die Ungewißheit darüber, was passieren wird, als unangenehm. Einige Verhaltensweisen²⁷ des Interviewers können besser später, wenn sie im Interview auftreten, erklärt werden.

ii) **Warming-Up**

Zu Beginn des *Warming-Up* wird der Recorder eingeschaltet.

Die ersten Minuten des Interviews sind für den weiteren Verlauf entscheidend, daher muß in dieser Zeit eine gute Atmosphäre geschaffen werden (KVALE, 1996).

Zu Beginn des Interviews sollten einfache Fragen gestellt werden. GUTJAHR (1985) mißt der ersten Frage eine besondere Bedeutung zu. Sie bestimmt die Haltung des Interviewpartners gegenüber den weiteren Fragen. Daher sollte sie den Charakter des weiteren Interviews veranschaulichen. Des weiteren muß sie einfach und spontan beantwortbar sein. Es ist sinnvoll, zu Beginn des Interviews eine offene Frage zu stellen, damit Äußerungshemmungen abgebaut werden können. Aus dem gleichen Grund muß die erste Antwort des Befragten, unabhängig von ihrem Inhalt, positiv bestätigt werden. Die erste Frage sollte weder ausfragend noch prüfend sein. Um den Befragten zu motivieren, kann in den Fragen Bezug auf eine soziale Rolle genommen werden, die er inne hat (GUTJAHR, 1985).

Diese Anforderungen sollen in den Interviews über Elektrochemie dadurch erfüllt werden, daß der Interviewer sich zu Beginn mit dem Schüler darüber unterhält, ob er sich schon mal mit Elektrochemie auseinandergesetzt hat und ob es ihm Spaß gemacht hat. Anschließend wird der Schüler gefragt, woran er

²⁷ Wie z. B., daß der Interviewer immer darauf achtet, daß aus der Tonaufzeichnung klar hervorgeht, wovon die Rede ist, wenn der Schüler auf einen Teil einer der verwendeten (Fortsetzung auf der nächsten Seite)

sich im Zusammenhang mit Elektrochemie besonders gut erinnern kann und was er als Schüler beim Lernen als besonders schwierig empfunden hat. In Tabelle 7 sind Leitfragen angegeben, die an dieser Stelle des Interviews benutzt werden können. Das ist nicht so zu verstehen, daß diese Fragen nacheinander vom Interviewer gestellt werden. Das Interview soll vielmehr den Charakter eines offenen Gespräches haben. Die in Tabelle 7 vorformulierten Fragen dienen dem Interviewer lediglich zur Erinnerung an die Themen, die er im Interview ansprechen möchte. In den Interviews hat sich gezeigt, daß die Schüler oft von selbst eines der im Interviewplan genannten Themen ansprechen oder daß sich das Gespräch von einem Thema zum nächsten entwickelt, ohne daß die in Tabelle 7 angegebenen Fragen benutzt werden müssen.

Das *Warming-Up* geht fließend in den *Hauptteil* des Interviews über. Dazu zeigt der Interviewer dem Schüler eine Skizze eines Daniell-Elementes und bittet ihn, zu beschreiben, was er sieht. Diese Aufgabe kann von jedem Schüler einfach gelöst werden. Sie bringt ihn dazu, für längere Zeit zu reden, ohne daß der Interviewer eingreifen muß. Durch die positive Rückmeldung des Interviewers wird der Schüler sicherer. Bei der Betrachtung der Zeichnung kann der Schüler sich sein Wissen über Elektrochemie wieder in Erinnerung rufen. Das ist wichtig, da es für manche Schüler ein halbes Jahr her ist, daß sie dieses Thema im Unterricht behandelt haben. Der Interviewer erhält durch diese erste Beschreibung der Skizze wichtige Informationen für die Steuerung des weiteren Gesprächs. Er erfährt etwas über den Wissensstand des Schülers und erhält erste Hinweise zu Punkten, die den Befragten besonders interessieren oder bei denen er unsicher ist.

iii) Hauptteil

Um den Hauptteil des Interviews zu strukturieren, werden zwei Skizzen (Abbildung 5) verwendet. Die erste der beiden Skizzen stellt ein Daniell-Element dar. Es handelt sich dabei um eine galvanische Zelle, die im Chemie-

Zeichnungen zeigt.

unterricht oft verwendet wird. Daher besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, daß sie vielen Schülern bereits bekannt ist. Die zweite Skizze stellt eine Elektrolysezelle dar. Im Interview werden beide Skizzen miteinander verglichen. Daher ist es sinnvoll, wenn diese sich so ähnlich wie möglich sind. In vorangegangenen Untersuchungen (GARNETT & TREAGUST, 1992b; SANGER & GREENBOWE, 1997a; MAROHN, 1999) wurden galvanische Zellen und Elektrolysezellen verwendet, die sich stark voneinander unterschieden²⁸. Dadurch wurden die Schüler beim Vergleich der beiden Zellen von den wesentlichen Punkten abgelenkt. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Untersuchung eine Elektrolysezelle verwendet, die sich vom Daniell-Element (Skizze 1 – Abbildung 5) nur dadurch unterscheidet, daß die Lampe in Skizze 1 durch eine Spannungsquelle ersetzt ist (Skizze 2 – Abbildung 5). Das führt zu einem etwas ungewöhnlichen Aufbau. Wenn man von der Spannungsreihe der Elemente ausgeht, würde man erwarten, daß sich an der Zinkelektrode der Skizze 2 Wasserstoff abscheidet. Aufgrund der dabei auftretenden Überspannung bildet sich jedoch statt dessen Zink²⁹.

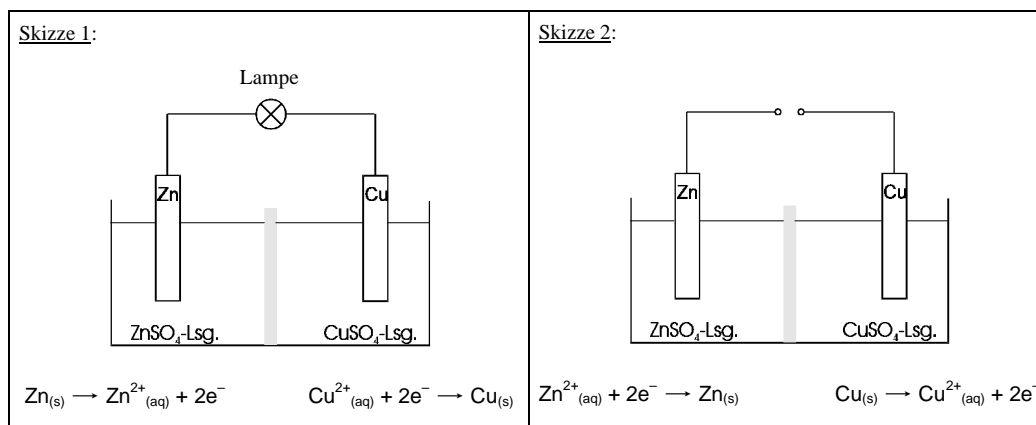


Abbildung 5: Die im Interview verwendeten Skizzen

²⁸ Z. B.: SANGER & GREENBOWE (1997a) thematisieren in ihren Interviews eine galvanische Zelle mit dem Zellsymbol $\text{Ni}_{(s)}|\text{Ni}(\text{NO}_3)_{2(aq)}::\text{AgNO}_{3(aq)}|\text{Ag}_{(s)}$ und die Elektrolyse einer wäßrigen AlBr_3 -Lösung.

²⁹ Dieser Umstand bereitete jedoch keinem der Schüler Probleme. Die in den Skizzen angegebenen Reaktionsgleichungen wurden in den Interviews als gegeben angenommen.

Am Ende des *Warming-Up* (s. oben) wird der Schüler gebeten, die erste Skizze (Skizze 1 – Abbildung 5) zu beschreiben. Wenn Schüler und Interviewer der Meinung sind, daß diese Skizze ausreichend diskutiert worden ist, bringt der Interviewer die zweite Skizze (Skizze 2 – Abbildung 5) in das Gespräch ein. Der Interviewer stellt sich auf die Antworten des Schülers ein. Er versucht die Themen des Interviewplans (Tabelle 7) anzuschneiden, wenn sie sich im Gespräch anbieten. Wieviel Zeit für welches Thema verwendet wird und in welcher Reihenfolge sie auftreten, ergibt sich aus den Antworten des Schülers. Dabei können auch neue Themen, die der Interviewplan nicht beinhaltet, vorkommen oder Themen des Interviewplans ausgelassen werden. Dadurch kann sich der Interviewer dem Befragten anpassen. So ist es möglich, daß die Punkte diskutiert werden, die dem Schüler wichtig sind. Das Gespräch wird dabei im wesentlichen durch die beiden Skizzen (Abbildung 5) und durch die Aufgaben, diese zu beschreiben, zu beschriften und miteinander zu vergleichen, strukturiert. Grundlegende Begriffe der Elektrochemie, die vom Schüler ausgelassen wurden, bringt der Interviewer gegen Ende des *Hauptteils* ins Gespräch ein. Um diese Aufgaben zu lösen, muß der Schüler sich mit allen grundlegenden Konzepten der Schulelektrochemie auseinandersetzen. Damit ist gewährleistet, daß das Interview zur Beantwortung der Forschungsfragen beitragen kann. Der Verlauf des Interviews ist oft zyklisch. Treten Probleme auf, wird der Schüler gebeten, diese so genau wie möglich zu beschreiben. Die Probleme werden immer wieder von unterschiedlichen Blickwinkeln angegangen. So kann beobachtet werden, wie der Schüler argumentiert, welches Wissen er dabei aktiviert und welche Argumente er überzeugend findet. Dazu ist viel Zeit nötig, was sich in der Länge der Interviews widerspiegelt. Die Tatsache, daß der Schüler alle Aussagen begründen und innerhalb des Interviews mehrfach über dieselbe Sache nachdenken muß, erhöht die Validität der Ergebnisse. Oft brauchen die Schüler Zeit, um sich wieder in das Thema des Interviews einzudenken. Der Interviewer achtet darauf, daß sich das Gespräch im wesentlichen um die Skizzen dreht und läßt dem Schüler viel Zeit zum Nachdenken³⁰. Au-

³⁰ Daher kann es in den Interviews auch zu längeren Pausen kommen, in denen nicht (Fortsetzung auf der nächsten Seite)

ßerdem hat der Interviewer vor Augen, daß das Interview später analysiert werden muß. Daher fragt er immer dann nach, wenn ihm etwas unklar ist. Wenn der Schüler etwas in eine Skizze einzeichnet oder auf einen Teil einer Skizze zeigt, sorgt der Interviewer dafür, daß später aus der Tonaufzeichnung eindeutig hervorgeht, um welchen Teil der Skizze bzw. der Beschriftung des Schülers es sich handelt³¹.

In den Probeinterviews hat sich gezeigt, daß die beiden Skizzen in Abbildung 5 gut geeignet sind, um mit ihrer Hilfe ein Gespräch über die grundlegenden Begriffe der Elektrochemie zu strukturieren. Die Aufgaben, diese beiden Skizzen zu beschreiben, zu beschriften und zu vergleichen führen zu Interviews, die gut genug strukturiert sind, um etwas über die Schülervorstellungen, die Verknüpfung dieser Vorstellungen und die Probleme der Schüler im Umgang mit Elektrochemie zu erfahren. Gleichzeitig sind sie offen genug, um in Erfahrung zu bringen, welche Punkte die Schüler interessant finden.

iv) Debriefing

Das *Debriefing* wird nur zum Teil aufgezeichnet und hat zwei Funktionen. Vor allem dient es dazu, das Interview zu einem guten Ende zu bringen, damit beim Schüler keine schlechten Gefühle oder Unsicherheiten zurückbleiben. Zum anderen dient es zur Validierung des Gespräches.

MAYRING (1996) gibt als Gütekriterium der qualitativen Sozialforschung die *kommunikative Validierung* an. Man kann die Ergebnisse der Interpretation dadurch überprüfen, daß man sie den Beforschten vorlegt und mit ihnen diskutiert. Im vorliegenden Fall erscheint es nicht sinnvoll, die Ergebnisse der Datenanalyse mit den Schülern zu diskutieren. Das liegt daran, daß die Analyse

gesprochen wird. Der Interviewer achtet dabei auf die Körpersprache des Schülers und unterbricht die Pause, wenn er den Eindruck hat, daß dieser sich unwohl fühlt.

³¹ Da den Schülern genau erklärt wurde, warum sich der Interviewer auf eine bestimmte Art verhält, haben die meisten Schüler nach einiger Zeit von selbst dazu gesagt, wo sie gerade hinzeigen. So wurde zum Beispiel die Aussage 'hier ist ...' von den Schülern vermieden und durch Aussagen wie 'an der linken Elektrode in der zweiten Skizze ist ...' ersetzt.

sehr langwierig ist und sich die Vorstellungen der Schüler in dieser Zeit stark verändern können³². Es ist folglich nicht zu erwarten, daß die Schüler zu einem späteren Zeitpunkt noch verlässliche Informationen über ihren Wissenstand während des Interviews liefern können. Daher beginnt das Debriefing mit einer Validierungsphase.

Zu Beginn der Validierungsphase wird der Schüler gebeten, die von ihm im Gespräch verwendeten Fachwörter kurz zu definieren. Dieser Frage liegt die Annahme zugrunde, daß es nicht selbstverständlich ist, daß der Schüler die entsprechenden Begriffsnamen auf die gleiche Art verwendet wie der Interviewer. Jede Kommunikation enthält eine Art Übersetzung, bei der der Empfänger das Gesagte interpretieren muß. Dies ist nicht im Sinne einer Übertragung von einer Darstellungsform in eine andere zu verstehen, da sich nicht nur die benutzten Wörter, sondern auch die zugrundeliegenden Bedeutungen unterscheiden (JOHNSON & GOTT, 1996). Die kurzen Begriffsdefinitionen sollen helfen, die vom Schüler verwendete Sprache so gut wie möglich zu verstehen.

Als nächstes wird der Schüler gebeten, Fragen zu formulieren, die er einem Fachmann stellen würde, um die Elektrochemie besser zu verstehen. Dabei soll sich der Schüler vorstellen, daß der Fachmann das vorangegangene Gespräch nicht gehört hat. Diese Frage bringt den Schüler dazu, nochmals über das vorangegangene Gespräch nachzudenken. So kann in Erfahrung gebracht werden, welche Punkte er besonders interessant findet und wo aus seiner Sicht Probleme auftreten. Die Unterstellung, daß der Fachmann das vorangegangene Gespräch nicht kennt, veranlaßt den Schüler, seine Probleme so genau wie möglich zu beschreiben.

Damit ist die Validierungsphase abgeschlossen. Bevor die Tonaufzeichnung beendet wird, erhält der Schüler die Gelegenheit, etwas anzumerken oder Fragen zu stellen, von denen er möchte, daß sie aufgezeichnet werden. Danach wird der Recorder abgeschaltet.

³² Ein großer Teil der Schüler absolvierte in dieser Zeit ihre Abiturprüfung im Fach Chemie.

Der Interviewer fragt den Schüler, ob dieser sich während des Interviews wohl gefühlt hat. Er teilt ihm mit, daß er noch weitere Interviews führen wird und daher wissen möchte, ob etwas an der Art der Interviewführung geändert werden sollte. Die so eingeforderte Rückmeldung ist jedoch nicht nur im Hinblick auf die folgenden Interviews wichtig. Diese Frage macht es dem Schüler auch leichter, Kritik an dem Interviewer zu äußern und kann somit helfen, eventuelle Probleme zu thematisieren und zu lösen. Hierbei geht es auch darum, sicherzustellen, daß der Schüler nicht mit einem schlechten Gefühl aus der Interviewsituation entlassen wird.

Der Interviewer gibt dem Schüler eine positive Rückmeldung.

Abschließend stellt der Interviewer fest, daß die verbleibende Zeit dem Schüler gehört. Der Interviewer sagt, daß er nun bereit ist, dem Schüler Rede und Antwort zu stehen. Das ist vor allem deshalb wichtig, weil der Interviewer während des Interviews keine Rückmeldung gegeben hat. Dies ist der gravierendste Unterschied zwischen dem Interview und einem normalen Gespräch. Wenn der Schüler die im Interview aufgetretenen, die Elektrochemie betreffenden Probleme klären möchte, können die zuvor vom Schüler formulierten Fragen an einen Fachmann sehr hilfreich sein. Es steht dem Schüler aber auch frei, über andere Themen zu reden³³ oder das Gespräch zu beenden.

4.2.3.2 Die Interviewsituation

Es wurden Lehrer gebeten, ihre Schüler zu fragen, ob sie freiwillig an der Untersuchung teilnehmen möchten. Gegebenenfalls wurden vom Interviewer Termine mit den Freiwilligen abgesprochen. Die Interviews wurden in den jeweiligen Schulen durchgeführt. Einige der Schüler wurden dafür von dem Chemieunterricht befreit, andere Interviews fanden in Freistunden der Schüler statt. Die Schulen stellten für die Dauer des Interviews Räume zur Verfügung.

³³ Einige Schüler wollten nicht weiter über Elektrochemie reden. So wurden beispielsweise Fragen über das Studieren an der Universität oder über die Abiturnote des Interviewers gestellt.

Die für das Interview angesetzten 90 Minuten entsprechen einer (Schul-) Doppelstunde und passen somit gut in den Stundenplan der Schüler. Von dieser Zeit werden je nach Verlauf des Gespräches zwischen 65 und 80 Minuten aufgezeichnet. Die restliche Zeit wird für *Briefing* und *Debriefing* verwendet (s. Abbildung 4).

4.3 Datenaufbereitung

Die Interviews werden mit einem Mini-Disc-Recorder aufgenommen. Die Tonaufzeichnung wird anschließend in ein Wave-File umgewandelt und auf eine CD gebrannt. Dadurch wird ein schneller, sekundengenauer Zugriff auf jede Stelle des Interviews am Computer möglich. Zusätzlich liegen die im Interview von den Schülern beschrifteten Skizzen vor (s. Anhang).

Die Tonaufzeichnungen werden wörtlich transkribiert. Während der Verschriftlichung wird der Text in einzelne Aussagen unterteilt. Jede Aussage entspricht dabei einer Zeile im Transkript. Die Zeilen werden fortlaufend nummeriert und in Minutenabständen mit einem *Time-code* versehen. Im Transkript wird vermerkt, welche Beschriftungen der Schüler in den Skizzen vornimmt. Dies läßt sich aus der Tonaufzeichnung und den Erinnerungen des Interviewers rekonstruieren. So kann auch später noch festgestellt werden, wann der Schüler welche Beschriftung vornahm bzw. änderte.

4.4 Analyse der Daten

Ziel der vorliegenden empirischen Untersuchung ist es, herauszufinden, welche Vorstellungen Schüler zur Elektrochemie haben und wie diese Vorstellungen miteinander verknüpft sind (s. Kap. 3). Daraus ergibt sich das folgende Ziel für die Datenanalyse:

- Ziel der Datenanalyse ist es, die *Argumentationsstränge* aus den einzelnen Interviews herauszuarbeiten und die Interviews miteinander zu vergleichen.

Mit *Argumentationssträngen* ist hier der sachbezogene Verlauf des Gespräches gemeint. Er beinhaltet die Argumente, die der Schüler anbringt, um seine Aus-

sagen zu begründen und die Überlegungen, aufgrund derer er gegebenenfalls seine Meinung ändert.

Zum Erreichen dieses Zieles muß der Forscher versuchen, sich in den Schüler hineinzuversetzen, um die Elektrochemie möglichst mit seinen Augen zu sehen. Dazu ist eine sofortige Unterscheidung von – aus naturwissenschaftlicher Sicht – richtigen und falschen Aussagen nicht sinnvoll. Diese Unterscheidung bleibt daher weitgehend der Diskussion der Ergebnisse vorbehalten. Die Grundhaltung des Forschers bei der Datenanalyse kann wie folgt zusammengefaßt werden:

The method may be briefly summarised as follows: Assign such meanings to a speaker's expressions that she comes out as consistent and a believer of truths.

(KLAASSEN & LIJNSE, 1996)

Der Verlauf der Datenanalyse ist in Abbildung 6 wiedergegeben. Zunächst werden die einzelnen Interviews unabhängig voneinander analysiert. Dies ist notwendig, um den Aussagen der einzelnen Schüler möglichst gerecht zu werden. Aufgrund der großen Datenmenge³⁴ und der aus der zyklischen Struktur der Interviews resultierenden Unübersichtlichkeit des Materials müssen zunächst einzelne Aspekte aus jedem Interview herausgearbeitet werden. Dies wird durch eine *zusammenfassende Inhaltsanalyse* erreicht. Dabei werden mehrere Zusammenfassungen des jeweiligen Interviews geschrieben. Jede Zusammenfassung deckt die Aussagen des Schülers zu einem bestimmten Thema ab. So wird beispielsweise eine Zusammenfassung der Aussagen zum Diaphragma geschrieben. Die Themen, nach denen die Interviews der vorliegenden Studie zusammengefaßt wurden, werden als Kategorien bezeichnet und befinden sich im Anhang. Die hier vorgenommene Zergliederung des Materials nach den verschiedenen Themen ist notwendig, da nur so die Aussagen des Schülers verstanden werden können. Erst danach ist der Forscher in der Lage,

³⁴ Ein Interview ist etwa 70 Minuten lang. Das entspricht ca. 50 Seiten Transkript.

sich ein zusammenhängendes Bild von dem jeweiligen Interview zu machen. Dazu werden im nächsten Schritt die *Argumentationsstränge* aus dem Interview herausgearbeitet. Auch hier werden die Interviews unabhängig voneinander betrachtet. Dieser Schritt stellt eine Interpretation des Materials dar. Hier werden die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Themen der Zusammenfassungen wieder hergestellt. Zum Abschluß der Analyse werden die aus den Interviews erhaltenen *Argumentationsstränge* miteinander verglichen. Die einzelnen Schritte der Analyse werden im folgenden näher beschrieben.

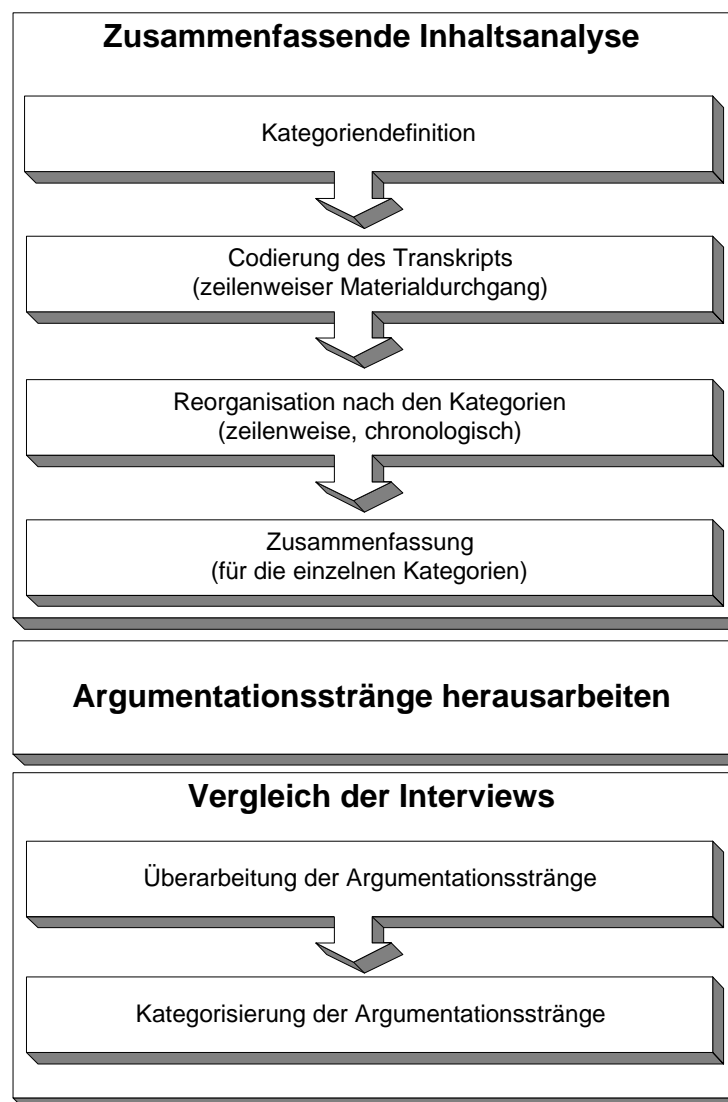


Abbildung 6: Verlauf der Datenanalyse

4.4.1 Die zusammenfassende Inhaltsanalyse

Der hier beschriebenen Teil der Analyse stellt eine an die Bedürfnisse der vorliegenden Untersuchung angepaßte Variante der *qualitativen Inhaltsanalyse*

dar. Sprachliches Material wird bei der *qualitativen Inhaltsanalyse* systematisch analysiert, indem es zergliedert und schrittweise bearbeitet wird. Am Material wird theoriegeleitet ein Kategoriensystem entwickelt, das die Analyseaspekte im Vorhinein festlegt (MAYRING, 1996). In der vorliegenden Arbeit wird dieser Teil der Analyse als *zusammenfassende Inhaltsanalyse* bezeichnet. Ihr Ziel ist es, theoriegeleitet Kategorien aus dem Material abzuleiten, nach denen das Material dann zergliedert und zusammengefaßt wird. So wird zu jedem der Aspekte, die sich in den Kategorien widerspiegeln, ein überschaubares Korpus geschaffen, das ein Abbild des Grundmaterials darstellt.

Um das zu erreichen, werden zunächst Kategorien gebildet. Im nächsten Schritt wird das Transkript zeilenweise durchgegangen und die Zeilen werden den jeweiligen Kategorien zugeordnet (Codierung). Dann wird das Material nach den einzelnen Kategorien reorganisiert und zusammengefaßt. Während der *zusammenfassenden Inhaltsanalyse* hat der Forscher das Ziel vor Augen, die *Argumentationsstränge* aus den Interviews herauszuarbeiten. Die einzelnen Schritte werden nun beschrieben.

4.4.1.1 Die Kategoriendefinition

Die Kategorien, die in diesem Analyseschritt festgelegt werden, dienen später als Blickwinkel, aus denen das Interview zusammengefaßt wird. Daher muß ein Kategoriensystem gefunden werden, mit dem alle wichtigen Inhalte des Interviews erfaßt werden können. Dabei werden drei unterschiedliche Arten von Kategorien verwendet (Tabelle 8).

<ol style="list-style-type: none"> 1. Kategorien, die sich aus der Struktur des <i>Interviewplans</i> ergeben (Stammkategorien) <ul style="list-style-type: none"> • Allgemeines (Beschreibung der Zellen als Ganzes, Vergleich der Zellen, etc.) • Elektrodenprozesse (Zinkelektrode, Kupferelektrode) • Elektrolyte • Diaphragma • Äußerer Stromkreis 2. Kategorien, die sich aus den Äußerungen der Schüler ergeben Diese Kategorien werden für jedes Interview gesondert festgelegt und kommen daher nicht bei allen Interviews zu Anwendung. Beispiele sind: <ul style="list-style-type: none"> • Chemisches Gleichgewicht (verwendet bei S1 und S9) • Ionen in der Lösung (Unterkategorie von 'Elektrolyte' / verwendet bei S4 und S6) 3. Untersuchung der Kommunikation im Interview (Stammkategorie) <ul style="list-style-type: none"> • Benutzung von Begriffsnamen

Tabelle 8: Arten von Kategorien bei der *zusammenfassenden Inhaltsanalyse*

Allen Interviews liegt der gleiche *Interviewplan* zugrunde. Daher weisen sie eine ähnliche Struktur auf, die sich letztendlich auf die Forschungsfrage zurückführen läßt. Bestimmte Themen müssen im Interview angesprochen und bei der Analyse berücksichtigt werden, um die Forschungsfrage zu beantworten. Diese Themen spiegeln sich in den Kategorien des ersten Typs (Tabelle 8) wider.

In der Kategorie des dritten Typs (Tabelle 8) geht es darum, die Kommunikation zwischen Interviewer und Schüler zu untersuchen. Das ist notwendig, da nicht sicher ist, daß der Schüler Begriffsnamen in der gleichen Art verwendet wie der Interviewer.

Bei jeder Kommunikation muß der Empfänger das, was er vom Sender wahrnimmt, interpretieren. Diese Interpretation erfolgt anhand des dem Empfänger eigenen *Bezugssystems*, das sich von dem des Senders unterscheidet. Daraus resultiert eine Ungenauigkeit bei jeder Kommunikation. Anders ausgedrückt: jede Art der Kommunikation enthält eine Übersetzung. Dabei geht es nicht nur um die Übertragung von einer Darstellungsform in eine andere, da sich nicht nur die verwendeten Wörter, sondern auch die zugrundeliegenden Bedeutungen unterscheiden. Zwischen den Individuen befindet sich eine *Schnittstelle* ("*translation interface*" – JOHNSON & GOTT, 1996). Daher muß versucht werden, einen *neutralen Bereich* ("*neutral ground*") zwischen Forscher und Schü-

ler zu entwickeln. In diesem Bereich kann eine weitgehend (aber niemals vollständig) unverzerrte Kommunikation zwischen Forscher und Schüler stattfinden. Der Forscher muß die Interpretation der Äußerungen des Schülers möglichst in einen *neutralen Bereich* vornehmen. Er muß also versuchen, die Antworten des Schülers so zu verstehen, wie dieser sie gemeint hat. Sein eigenes Bezugssystem sollte möglichst nicht als Maßstab der Bewertung dienen (JOHNSON & GOTT, 1996). In der Praxis kann sich der Forscher natürlich nicht von seinem *Bezugssystem* lösen. Hier fließen seine *Vorstellungen* über das *Bezugssystem* des Schülers in die Analyse ein. Es wird nicht unterstellt, daß sich der Schüler einer korrekten Fachsprache bedient.

Bei der Untersuchung der Kommunikation in der Kategorie "Benutzung von Begriffsnamen" wird daher systematisch nach Hinweisen dafür gesucht, wie der Schüler die von ihm verwendeten Schlüsselwörter versteht. Dieser Ansatz findet sich auch in dem *Interviewplan* wider. Der Schüler wird in der Validierungsphase des *Debriefings* (s. Kap. 4.2.3.1) gebeten, die von ihm benutzten Fachwörter zu definieren. Bei der Analyse wird für das gesamte Interview untersucht, wie der Schüler diese Begriffe verwendet hat. Dadurch wird die Validität der Ergebnisse erhöht.

Die Kategorien des ersten und des dritten Typs (Tabelle 8) werden bei der Analyse aller Interviews verwendet. Sie stellen die Stammkategorien dar.

Um jedem einzelnen Interview gerecht zu werden, müssen darüber hinaus weitere Kategorien definiert werden, die besondere Aspekte des Einzelfalles beinhalten. Es werden neue Kategorien und Unterkategorien gebildet. Dazu wird das zu analysierende Interview mehrfach intensiv angehört und das Transkript mehrfach gelesen. Die dabei verwendete Leitfrage kann wie folgt formuliert werden:

- Welche wichtigen Inhalte des Interviews werden durch die Stammkategorien nicht ausreichend erfaßt?

Die Kategoriensysteme, die zur weiteren Analyse der einzelnen Interviews verwendet wurden, finden sich im Anhang.

4.4.1.2 Die Codierung

Bei der Codierung wird das Transkript zeilenweise durchgegangen. Am Rand des Textes werden die Nummern der Kategorien notiert, denen die Zeilen zugeordnet werden. Wenn die Aussage der Zeile sich auf eine bestimmte Skizze bezieht wird diese zusätzlich vermerkt. Wird eine Zeile der Kategorie "Benutzung von Begriffsnamen" zugeordnet, wird außerdem festgehalten, um welchen Begriffsnamen es sich handelt.

In diesem Analyseschritt versucht der Forscher, das Interview zu verstehen. Das Material wird solange bearbeitet, bis er für jede Zeile des Transkriptes eine Interpretation hat, die ihm logisch erscheint. Dazu können mehrere Materialdurchgänge notwendig sein. Schlüsselstellen des Materials werden zur Überprüfung der Verschriftlichung nochmals angehört und mit dem Transkript verglichen.

Der Forscher markiert Zeilen des Transkriptes, die seiner Meinung nach eine *Intervention* oder einen *Wendepunkt* darstellen. Eine *Intervention* ist ein Eingreifen des Interviewers, das die *Vorstellungen* des Schülers beeinflusst. Es kann sich dabei um eine Information oder um eine Aufgabe handeln, die der Interviewer dem Schüler gibt. Eine *Intervention* geht immer vom Interviewer aus. Ein *Wendepunkt* ist eine Stelle des Interviews, an der der Schüler seine Meinung ändert. Die Nummern der entsprechenden Zeilen werden in eine Liste eingetragen. Dadurch ist bei der weiteren Analyse leicht feststellbar, ob eine Aussage vor oder nach einer *Intervention* oder einem *Wendepunkt* gemacht wurde. Nicht jede Aussage des Interviewers stellt eine *Intervention* dar. Nicht jede *Intervention* hat einen *Wendepunkt* zur Folge und nicht jeder *Wendepunkt* resultiert aus einer *Intervention*³⁵.

³⁵ Die Interviews der vorliegenden Untersuchung enthalten typischerweise zwischen zwei und vier *Interventionen* und zwischen einem und drei *Wendepunkte*.

4.4.1.3 Die Reorganisation

Das gesamte Transkript wird für jede Kategorie durchgegangen. Dabei werden alle Aussagen, die einer bestimmten Kategorie zugeordnet sind, zusammengetragen. Dies kann in Form eines wörtlichen Zitats oder einer Paraphrase geschehen. Wenn nötig, werden zusätzliche Angaben über den Kontext der Aussage gemacht. Somit entsteht für jede Kategorie eine *Reorganisation* des Interviews. Eine Ausnahme bildet die Kategorie "Benutzung von Begriffsnamen". Für sie wird keine eigene *Reorganisation* angefertigt. Die aus ihr abgeleiteten Erkenntnisse fließen in die anderen Reorganisationen ein.

Die *Reorganisationen* beinhalten die Chronologie des Interviews und alle Wiederholungen, die der zyklische Verlauf mit sich bringt.

Alle Aussagen der *Reorganisationen* sind mit den Zeilennummern versehen, unter denen sie im Transkript aufzufinden sind. Die Stellen, an denen sich im Interview eine *Intervention* oder ein *Wendepunkt* befindet, werden markiert. Das gilt auch dann, wenn diese nicht zu der Kategorie gehören, für die eine *Reorganisation* geschrieben ist. So geht aus den *Reorganisationen* eindeutig hervor, ob eine Aussage vor oder nach einem solchen Ereignis gemacht wurde.

Die *Reorganisation* des Interviews stellt einen Zwischenschritt bei der Erstellung der *Zusammenfassungen* dar, der aufgrund der Komplexität des Materials notwendig ist.

4.4.1.4 Die Zusammenfassung

Für jede Kategorie³⁶ wird eine eigene *Zusammenfassung* des Interviews angefertigt. Grundlage dafür sind die *Reorganisationen*. Dabei wird die Chronologie des Gesprächs aufgegeben, sofern sie nicht von inhaltlichem Interesse ist. Der zyklische Charakter der Interviews bringt einige Wiederholungen mit sich. Ähnliche oder gleiche Aussagen können immer dann zu einer Aussagen zusammengefaßt werden, wenn sich bei den zyklischen Durchgängen im Interview keine Entwicklung abzeichnet.

³⁶ Mit Ausnahme der Kategorie "Benutzung von Begriffsnamen" (s. Kap. 4.4.1.3).

So entsteht zu jeder Kategorie ein kurzer, lesbarer Text, der alle für das betreffende Thema relevanten Informationen und die inhaltliche Entwicklung des Gespräches wiedergibt.

Bei der *Zusammenfassung* interpretiert der Forscher das Material, um zu entscheiden, auf welche Aussagen eine *Intervention* oder ein *Wendepunkt* Einfluß hat. Daher sind diese Ereignisse nur in den *Zusammenfassungen* enthalten, wenn sie einen erkennbaren Einfluß auf das gerade beschriebene Thema haben. Da die *Zusammenfassungen* nicht mehr chronologisch sind, enthalten sie keine Zeilennummern des Transkriptes.

Das Ergebnis der *zusammenfassende Inhaltsanalyse* ist eine *Zusammenfassung* für jede der zu Beginn der Analyse festgelegten Kategorien. Diese *Zusammenfassungen* stellen zusammengenommen ein Abbild des Interviews dar. Sie enthalten die Argumentationsketten des Gesprächs.

4.4.2 Das Herausarbeiten der Argumentationsstränge

Ausgehend von den *Zusammenfassungen* werden die *Argumentationsstränge* des Interviews herausgearbeitet. Dadurch entsteht eine Darstellung, aus der sich die *Vorstellungen* des Schülers zur Elektrochemie, deren Verknüpfungen untereinander und die Entwicklung im Gespräch ablesen lassen. In diesem Analyseschritt zeigt sich, welche *Annahmen* der Schüler macht und welche Aussagen er daraus ableitet. *Wendepunkte* und *Interventionen* treten hier als Teile von Argumentationsketten auf. Die *Argumentationsstränge* enthalten nur Aussagen aus dem Interview, die Teile einer Argumentationskette sind, welche für den Forscher nachvollziehbar ist. Daher sind die durch die *Argumentationsstränge* repräsentierten Ergebnisse aussagekräftiger als Ergebnisse, die sich aus der bloßen Beantwortung einer einzelnen Frage eines strukturierten Interviews durch den Schüler ergäben.

Um die *Argumentationsstränge* eines Interviews herauszuarbeiten, geht der Forscher die *Zusammenfassungen* des Interviews durch und erstellt eine graphische Darstellung des sachlichen Verlaufs des Gesprächs. Dieser Vorgang stellt eine Interpretation des Materials dar. Durch die lange Auseinandersetzung mit dem Interview bei der Transkription und bei der *zusammenfassenden Inhaltsanalyse* kennt der Forscher das Material sehr gut. Diese Vorbereitung hilft ihm dabei, die durch das Kategoriensystem vorgegebene Zergliederung des Interviews schrittweise zu durchbrechen. Die graphische Darstellung wird in Textform überführt. Die so erhaltenen *Argumentationsstränge* stellen die Grundlage für den Vergleich der Interviews dar.

4.4.3 Der Vergleich der Interviews

Bislang wurden die Interviews einzeln betrachtet. In diesem Analyseschritt geht es nun darum, einen Überblick über das gesamte Material zu bekommen. Zuvor werden jedoch alle *Argumentationsstränge* noch einmal überarbeitet. Das ist notwendig, da sich das Verständnis des Forschers von dem Forschungsgegenstand im Verlauf der bisherigen Datenanalyse verändert haben kann. Es ist daher möglich, daß er die ersten Interviews nun anders bewertet, als es bei der vorangegangenen Analyse der Fall war.

Nach der Überarbeitung werden die in den *Argumentationssträngen* enthaltenen Aussagen kategorisiert. Dabei werden die Aussagen in Themengebiete unterteilt und ähnliche Aussagen zusammengefaßt. Das Ergebnis ist eine Tabelle aller Aussagen aus den Interviews, die Teil einer für den Forscher verständlichen Argumentationskette sind. Für jede Aussage enthält die Tabelle genaue Angaben darüber, wo sie in den *Argumentationssträngen* zu finden ist. Die Zusammenhänge zwischen den Aussagen gehen dabei verloren. Die vorliegende Untersuchung zielt jedoch genau auf diese Zusammenhänge ab. Daher stellt diese Tabelle kein eigenständiges Ergebnis der Untersuchung dar. Sie dient dem Forscher lediglich dazu, sich einen Überblick über das Material zu verschaffen und bereitet somit die Darstellung der Ergebnisse vor.

Um Mißverständnisse zu vermeiden, sei hier angemerkt, daß die Auswahl der Themen für die Darstellung der Ergebnisse nicht danach erfolgt, wie oft eine Aussage vorkommt. Durch die Tabelle kann der Forscher, wenn er sich mit einer interessanten Aussage eines Schülers beschäftigt, schnell herausfinden, ob andere Schüler auch etwas zu dem gleichen Thema gesagt haben. Die Tabelle liefert gegebenenfalls Verweise auf die entsprechenden Stellen der *Argumentationsstränge*. Die Darstellung der Ergebnisse basiert auf den *Argumentationssträngen*. Die Funktion der aus der Kategorisierung der Aussagen des Gesamtmaterials resultierenden Tabelle kann mit der einer Landkarte verglichen werden. Mit Hilfe dieser 'Landkarte' kann der Forscher sich in den Daten orientieren³⁷.

Die Kategorisierung der *Argumentationsstränge* ist ein wichtiger Schritt zur Vorbereitung der Ergebnisdarstellung. Die dabei gebildeten Kategorien stellen jedoch kein eigenständiges Ergebnis der Untersuchung dar und sollten nicht überbewertet werden.

³⁷ Durch die starke Systematik bei der Erstellung der *Argumentationsstränge* ist es leicht möglich, die Stellen des Interviews zu finden, auf die sich eine Aussage eines *Argumentationsstranges* stützt. Dazu kann der Weg von den *Argumentationssträngen* über die *Zusammenfassungen*, die *Reorganisationen* und das Transkript bis zur Tonaufzeichnung in kurzer Zeit nachvollzogen werden.

5 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

Die Darstellung und Interpretation der Ergebnisse basieren auf den aus den Interviews abgeleiteten *Argumentationssträngen*. Um einen Überblick über die Interviews zu erhalten, wurden alle Aussagen, die in den *Argumentationssträngen* enthalten sind, kategorisiert (s. Kap. 4.4). Die so erhaltenen Kategorien werden in Tabelle 9 wiedergegeben. Sie diente bei der Darstellung der Ergebnisse als 'Landkarte' zur Orientierung im Datenmaterial. Alle Aussagen der *Argumentationsstränge* konnten einer oder mehrerer dieser Kategorien zugeordnet werden. Die Kategorie "Sonstiges" enthält nur eine Aussage eines Schülers.

1. Die treibende Kraft in den elektrochemischen Zellen
2. Die Quelle in Skizze 2
3. Die sequentielle Beschreibung
4. Der Stromfluß
5. Die Stromverbrauchsvorstellung und Strom als Vermittler einer Wirkung
6. Die Reduktionsreaktionen binden Elektronen an die Elektrode
7. Die Wechselwirkungen zwischen Ladungen
8. Minuspol/Pluspol – negativ/positiv
9. Anode/Kathode
10. Gleiche Pole – gleiche Reaktionen
11. Die Vorgänge in den Lösungen
12. Das Diaphragma
13. Das chemische Gleichgewicht
14. Der Elektronenaustausch zwischen den Reaktionen
15. Die Reaktionsgleichungen

16. Der Vergleich zwischen galvanischen Zellen und Elektrolysezellen
17. Die Erkennungsmerkmale für Galvanolyse und Elektrolyse
18. Die Erhaltungssätze (Stoff- und Energieerhaltung)
19. Die Kenntnis des Daniell-Elementes aus dem Unterricht
20. Die Perspektivenwechsel
21. Sonstiges

Tabelle 9: Kategorisierung der Aussagen aus den Argumentationssträngen.

Die Art der Darstellung des Datenmaterials leitet sich aus dem so erhaltenen Überblick ab. Eine besonders treffende Darstellung ist möglich, wenn man acht 'Geschichten' erzählt (Tabelle 10). In diesen 'Geschichten' wird beschrieben, an welchen Punkten sich die Schüler besonders 'gerieben' haben. Es wird gezeigt, wo sie Probleme hatten, an welchen Stellen ihre Beschreibungen zwar logisch, aber dennoch mit der naturwissenschaftlichen Sichtweise unvereinbar waren und welche widersprüchliche Aussagen die Schüler machten. Die 'Geschichten' enthalten somit alle wesentlichen Ergebnisse der Datenanalyse.

In jeder 'Geschichte' werden nach einem kurzen Überblick die für sie relevanten Aussagen der Schüler zusammengefaßt. Hier soll der Leser einen Eindruck von den Interviews bekommen. Daher sind die Formulierungen sehr nah an die der Schüler angelehnt. Zur weiteren Illustration werden an geeigneter Stelle Schüler wörtlich zitiert. Der Text ist so geschrieben, daß er auch ohne diese Zitate verständlich bleibt. Den Abschluß jeder 'Geschichte' bildet eine Diskussion. Hier wird die Quintessenz der Interviews herausgearbeitet. Es werden Vergleiche mit den Ergebnissen anderer Forscher angestellt. Wenn nötig, wird über die naturwissenschaftliche Beschreibung der Phänomene reflektiert. Aus dieser Diskussion ergeben sich Aussagen, die sich direkt auf das Unterrichten von Elektrochemie in der Schule beziehen. Sie stellen Schlußfolgerungen des Autors dar. Diese Aussagen sind durch eine Umrahmung kenntlich gemacht und werden als 'Stellungnahme' bezeichnet. Am Ende der Arbeit befindet sich ein Verzeichnis der Stellungnahmen (s. Kap. 13).

Eine Zusammenfassung der Diskussion ist in Kap. 6 zu finden.

Kap. Nr.	Überschrift der 'Geschichte'
5.1	Die treibende Kraft elektrochemischer Reaktionen
5.2	Elektrodenreaktionen
5.3	Elektrizitätslehre
5.4	Vorgänge in den Lösungen
5.5	Diaphragma
5.6	Benutzung von Begriffen
5.7	Perspektivenwechsel
5.8	Probleme aufgrund der gestellten Aufgabe

Tabelle 10: 'Geschichten' zur Darstellung der Ergebnisse

Um die Schülerzitate leichter lesbarer zu machen, werden sie in überarbeiteter Form abgedruckt. Es sind beispielsweise Füllwörter (wie "Ähm") und abgebrochene Sätze ausgelassen, wenn dies ohne eine inhaltliche Veränderung der Aussage möglich ist. Die Zitate entsprechen insofern nicht mehr den Transkripten. An einigen Stellen sind Teile des Zitats kursiv gedruckt, die für die Interpretation besonders wichtig sind.

Den Zitaten wird in eckigen Klammern vorangestellt, wer zitiert wird (Schüler [S#:], Interviewer [I:]). Vom Interviewer Gesagtes ist fettgedruckt.

Am Ende des Zitates ist in eckigen Klammern die Zeit angegeben, bei der das Zitat beginnt, und die Skizze, über die gerade gesprochen wird. [Stunde: Minute – Skizze #]. Fehlt die Angabe der Skizze, kann die Aussage keiner der beiden Skizzen zugeordnet werden.

5.1 Die treibende Kraft elektrochemischer Reaktionen

In dieser 'Geschichte' wird beschrieben, welche Ursachen die Schüler für die von ihnen beschriebenen Vorgänge in den Zellen angeben.

Die meisten Schüler gehen davon aus, daß die Vorgänge in der galvanischen Zelle von allein ablaufen (Kap. 5.1.1) und in der Elektrolysezelle durch die

Quelle erzwungen werden (Kap. 5.1.2). Diese Vorstellung ist aus naturwissenschaftlicher Sicht richtig.

Eine besonders interessante Vorstellung wird in Kap. 5.1.3 beschrieben. Hier geht ein Schüler davon aus, daß die Zelle aufgeladen werden muß, bevor sie – gemäß Skizze 1 – die Lampe betreiben kann. Skizze 2 entspricht dabei dem Ladevorgang.

In Kap. 5.1.4 werden diese Ergebnisse diskutiert.

5.1.1 Galvanische Zelle

Bis auf S3 und S9 gehen alle Befragten davon aus, daß die Vorgänge im galvanischen Element von allein, also freiwillig ablaufen.

Dies wird auf die "Beschaffenheit der Elektroden" (S2) oder auf die "Unterschiede zwischen den Substanzen" (S6) zurückgeführt.

Einige Schüler sprechen in diesem Zusammenhang über die "Spannungsreihe" (S3, S7, S8), die auch als "Fällungsreihe" (S10) oder einfach als "Tabelle" (S1) bezeichnet wird. Aus ihr geht hervor, welche Elektrode der Pluspol ist (S3), welches Element das stärkere Reduktionsmittel ist und somit Elektronen abgibt (S7) oder welche Elektrode das niedrigere Potential hat und somit die Anode ist (S8). S1 sagt, daß aus der Tabelle hervorgeht, welches Element welche Tension hat. Hierbei wird zwischen Abscheidungstension und Lösungstension unterschieden (s. Kap. 5.2.2).

Als Einziger argumentiert S10 mit einem Spannungsbegriff, der von ihm wirklich vom Strombegriff getrennt wird. Für ihn sind die Metalle in der Fällungsreihe geordnet. Zwischen elementaren Metallen und den Ionen in der Lösung bildet sich ein Ruhepotential. Somit haben die Halbzellen unterschiedliche Ruhepotentiale. An der Membran wird daraus eine Potentialdifferenz. Diese bewirkt den Elektronenfluß.

[S10:] Wobei der Elektronenfluß ja eigentlich [...] nicht das Entscheidende an der Elektrochemie ist. Das ist vielmehr praktisch das, was aus diesen [...] Potentialen, die sich aus diesen Ionen ergeben, [...] folgt. [0:45 – Skizze 1]

[S10:] [...] das hängt auf jeden Fall eben mit diesen Potentialen zusammen. Eine Zinkhalbzelle hat eben auf jeden Fall ein höheres Potential als eine Kupferhalbzelle. Und .. das heißt also, daß [...] der Elektronenfluß der läuft praktisch immer von dem höheren zu dem niedrigeren. Das – würde ich sagen – ist auf jeden Fall auch ein Prinzip der Elektrochemie. [0:57 – Skizze 1]

S4 und S6 sprechen von edlen und unedlen Metalle, wobei das unedlere Metall Elektronen an das edlere abgibt.

5.1.2 Elektrolysezelle

Einige Schüler geben an, daß die Vorgänge bei der Elektrolyse "andersherum" sind als bei der galvanischen Zelle (S4, S9). Für S3 ist die "Galvanolyse" die Umkehrung der Elektrolyse.

S3 und S4 sagen, daß die Quelle Energie an die Zelle abgibt und Elektronen zum Fließen bringt. Dadurch wiederum finden die Reaktionen statt (S4).

Einige Schüler (S1, S6, S8) folgern aus dem Vergleich der Elektrolysezelle mit der zuvor von ihnen beschriebenen galvanischen Zelle, daß die Quelle die Ursache für die Vorgänge ist. Dies ergibt sich daraus, daß die vorgegebenen Reaktionsgleichungen in Skizze 2 die Umkehrung der Gleichungen in Skizze 1 sind.

S6 geht davon aus, daß die Quelle die Stromrichtung vorgibt und somit die Richtung der Reaktionen beeinflusst.

[S6:] Die Frage stellt sich mir jetzt natürlich, warum genau die Elektronenrichtung [in Skizze 2] anders rum ist [als in Skizze 1]. Daß das Kupfer sozusagen als Ion ausfällt und Zinkionen zu Zink werden. Also diese Fragestellung beschäftigt mich gerade. ... Weil wenn man den Gleichstrom [= die Stromquelle] dazwischen wegläßt und wieder einen Verbraucher dazwischen schaltet, wie bei dem ersten Blatt [Skizze 1], dann fließt es ja genau anders rum. Daraus schließe ich, daß Kupfer edler ist als Zink. Nur stellt sich mir die Frage, warum jetzt gerade Zink die Elektronen erhält. Also kann der einzige Grund nur sein, daß der Strom das Kupfer so beeinflusst, daß es Elektronen abgibt. [0:22 – Skizze 1 & 2]

Für S1, der schon bei der Galvanischen Zelle mit Tensionen argumentiert hat, vertauscht die Quelle die Tensionen an den Elektroden. Dies geschieht, indem

sie "fremde Elektronen", die nichts mit der Lösung zu tun haben, in die Lösung gibt (s. Kap. 5.3.2.3 – Quelle-Verbraucher-Modell).

[S1:] [...] müßte sich in der ersten Zeichnung Kupfer und Zink immer so verhalten, das heißt ohne Einfluß von Strom, das heißt von diesen Elektronen die nicht aus der Lösung kommen. Und ich könnte mir vorstellen, daß es, wenn sozusagen fremde Elektronen mit dazukommen, so aussieht wie in der zweiten Zeichnung.

[I:] **Der Begriff 'fremde Elektronen' interessiert mich. Kannst du das noch weiter umschreiben?**

[S1:] Das sind nicht die Elektronen, die aus der Lösung kommen [...] von der Kupferelektrode [...], sondern aus der Stromleitung, die ja nichts mit Kupfer oder Kupfersulfat gemeinsames zu tun haben. Das heißt, die eigenen Elektronen kommen ja aus diesen Verbindungen und die fremden eben aus einer Stromquelle. [0:37 – Skizze 1 & 2]

[S1:] wenn eine große Menge von Elektronen in Lösung zugeführt wird, aus dieser Stromquelle, daß sich die Wirkung dann so umschlägt, daß Lösungstension dann zu Abscheidungstension wird und umgekehrt. [1:02 – Skizze 2]

S6 und S7 beschreiben, daß die Quelle die Stromrichtung vorgibt. S10 erklärt, daß mit der Quelle Strom hinzugefügt wird und daß man, wenn man den Strom richtig herum anlegt, die Reaktionen andersherum ablaufen lassen kann als sie es normalerweise täten.

[S10:] Ja, jedenfalls muß man jetzt hier Strom hinzufügen, weil man eine Reaktion haben will die [...] gegen die Potentiale praktisch laufen soll. [schreibt in Skizze 2] Wie soll ich sagen? ... [schreibt in Skizze 2] Ja, schreibe ich einfach mal so: gegen Potential und [...] weil Zn hat eben das höchste Potential von den Metallionen. [0:56 – Skizze 2]

Dabei gehen S6 und S10 davon aus, daß man mit der Quelle die Reaktionen in beide Richtungen ablaufen lassen kann.

S7 fragt, ob man die Quelle auch so anschließen kann, daß sie den Strom des galvanischen Elementes verstärkt und nicht umkehrt. Für ihn muß die Quelle den Strom des galvanischen Elementes überwinden, bevor sie den Stromfluß umkehren kann³⁸.

³⁸ Hier werden – wie auch von anderen Schülern – die Begriffsnamen 'Strom' und 'Spannung' fast gleichbedeutend verwendet.

[S7:] [...] am Anfang [...] hatten wir so eine Kurve, Strom – ich weiß jetzt nicht, eine Spannungskurve? Auf jeden Fall, die verlief jetzt irgendwie so [Graph im unteren Bereich]. [...] am Anfang mußte eine bestimmte Stromstärke da sein, so daß [...] dieser Stromfluß, der eigentlich von allein fließt – was im ersten Element ja deutlich wird [Skizze 1] – daß der überwunden wird und daß sich so das dann umkehren kann. Deswegen [...] steigt die Kurve kaum an und dann, wenn [...] diese Spannung vom galvanischen Element überwunden wurde, daß das dann stark ansteigt. [0:19 – Skizze 2]

Auch für S2 kann man mit Hilfe der Quelle die Reaktionen in unterschiedliche Richtungen ablaufen lassen. Für ihn löst die Quelle die Vorgänge in der Zelle aus, die als Verbraucher angesehen werden kann. Je nach dem, wie man die Quelle anschließt, werden die Elektroden unterschiedlich aufgeladen. Diese Ladung der Elektroden ist dann der Startpunkt für die weiteren Vorgänge in der Zelle (s. Kap. 5.3.2.1).

5.1.3 Zyklus bestehend aus Laden und Entladen

Die Beschreibungen von S9 stellen einen Sonderfall dar. Dieser Schüler beschreibt, daß die Zelle durch die Quelle aufgeladen werden muß, bevor sie sich anschließend durch die Lampe wieder entladen kann.

Eine ähnliche Beschreibung liefert auch S3.

[S3:] Also das, was ich in die Elektrolyse als Energieinhalt [...] rein gesteckt habe, kann ich jetzt durch die Umkehrung wieder raus holen. Das heißt, sobald ich [...] den Stromkreis kappe, dann würde noch nichts passieren. Dann habe ich den Energieinhalt da drin und es passiert nichts. Sobald ich diese beiden Drähte aber wieder kurzschließen würde [...], also erst wenn ich wieder die Verbindung zwischen beiden habe und zwar beide Verbindungen: einmal hier unten, im Prinzip durch das Diaphragma und einmal durch den Stromkreislauf da oben. Erst dann kann ich die Energie, die ich vorher [...] rein gesteckt habe, nutzen. Und der Unterschied ist halt dann, beim einen stecke ich es rein und beim anderen nehme ich Energie raus. [1:11 – Skizze 1 & 2]

Dabei berücksichtigt S3, daß die Energie in den Zellen durch chemische Reaktionen gespeichert bzw. freigesetzt wird. Das ist bei S9 nicht der Fall. Er geht davon aus, daß die Zelle beim Aufladen Energie in Form von elektrostatischer Energie speichert.

S9 unterscheidet zwei Fälle. Zum einen eine Apparatur mit einer durchlässigen und zum anderen eine Apparatur mit einer undurchlässigen Trennwand zwi-

schen den Lösungen. Im folgenden wird zunächst der Aufbau mit einer undurchlässigen Trennwand beschrieben.

5.1.3.1 Aufbau mit undurchlässiger Trennwand (S9)

i) Ladevorgang (S9)

Bevor etwas passieren kann, muß die Apparatur aufgeladen werden. Das geschieht bei einer undurchlässigen Trennwand durch die Stromquelle. Dies entspricht der Skizze 2 und wird – nachdem diese Skizze vom Interviewer präsentiert wurde – auch auf diese angewendet. Der Schüler beschreibt jedoch schon vorher – als ihm nur Skizze 1 vorgelegt wurde – einen Ladevorgang, der dem Aufbau mit der Lampe (Skizze 1) vorausgehen muß. Diese Beschreibung wird nach der Präsentation von Skizze 2 weiter ausformuliert, aber nicht grundsätzlich verändert.

[I:] Diese Zeichnung [Skizze 1], hat die was mit dem Fall zu tun, den du / mit einem der Fälle zu tun, den du vorher beschrieben hast?

[S9] Ja, das ist praktisch, wenn man die Stromquelle wegnimmt, kann man ja statt dessen eine Lampe anschließen, wie das in dem anderen Bild ist [Skizze 1]. Und dann findet diese Reaktion eben andersherum statt. Und das ist praktisch diese Umkehrreaktion dann. Das heißt also, mit der Quelle [...] wird der ganze Komplex aufgeladen und dadurch, daß man die Lampe dazwischen schließt, also dadurch den Stromkreis schließt, kann sich das Ganze wieder entladen. [0:34 – Skizze 1]

Die Quelle gibt Elektronen an die eine Halbzelle ab, der anderen entzieht sie Elektronen. Die Richtung der Reaktionen wird dadurch erzwungen, die Gleichgewichte an den Elektroden werden verschoben (s. Kap. 5.2.2). Dabei werden die Halbzellen aufgeladen.

Die Halbzelle, die mit dem negativen Pol der Quelle verbunden ist, wird negativ aufgeladen, sie ist während des Ladevorganges positiv. Die mit dem positiven Pol der Quelle verbundene Halbzelle wird positiv aufgeladen und ist während des Ladevorganges negativ (s. Kap. 5.6.1 und Kap. 5.6.4).

ii) Geladener Zustand (S9)

Nach dem Aufladen wird die Quelle entfernt. Der äußere Stromkreis ist unterbrochen.

Die Halbzelle, die mit dem negativen Pol der Quelle verbunden war, trägt eine negative Ladung, da sie einen Überschuß an Elektronen hat. Die andere Halbzelle hat einen Mangel an Elektronen, sie ist positiv. Die Gleichgewichte an den Elektroden sind verschoben (s Kap. 5.2.2).

iii) Entladungsvorgang (S9)

Der äußere Stromkreis der Apparatur wird mit der Lampe geschlossen. Die Ladungen der Halbzelle gleichen sich aus.

Da die Halbzellen nicht freiwillig geladen vorliegen, fließen Elektronen durch die Lampe von der negativen Halbzelle in die positive Halbzelle. Bei einer undurchlässigen Trennwand zwischen den Lösungen gibt es keine andere Verbindung zwischen den Halbzellen.

Wie lange dieser Strom fließt, hängt davon ab, wie stark die Zelle vorher mit der Quelle aufgeladen wurde.

Bei dem Entladungsvorgang stellen sich die Gleichgewichte an den Elektroden wieder ein (s. Kap. 5.2.2).

Das beim Aufladen entstandene Potential bildet sich wieder zurück.

iv) Ungeladener Zustand (S9)

Hat die negative Elektrode genügend Elektronen abgegeben und die positive genügend aufgenommen, um die Ladungen auszugleichen, so ist das Gleichgewicht wieder hergestellt.

An den Elektroden finden im gleichen Umfang Hin- und Rückreaktionen statt (s. Kap. 5.2.2). Dabei werden keine Elektronen über den Draht ausgetauscht, es ist kein Strom meßbar.

5.1.3.2 Aufbau mit durchlässiger Trennwand (S9)

Bei durchlässiger Trennwand können die Halbzellen durch die Quelle nicht aufgeladen werden, da durch die Trennwand sofort ein Ladungsausgleich stattfindet. Es entsteht dabei ein Kreislauf, bei dem beispielsweise eine Elektrode, die Elektronen an den Draht abgibt, gleichzeitig Elektronen von der Lösung

aufnimmt. Daher kann weder ein Elektronenmangel noch ein Elektronenüberschuß entstehen.

Der Ladungsausgleich durch die Trennwand entspricht dem Entladungsvorgang, nur daß er sofort und nicht durch den Draht, sondern durch die Trennwand stattfindet.

[S9:] Dann ist das ein Kreislauf. Und da kann man [...] dann hinterher nicht feststellen, daß eine Elektrode positiv oder eine negativ geladen ist. Das ist nur der Fall, wenn [...] die Halbzellen getrennt sind. Das also da kein Ausgleich in den Gefäßen stattfinden kann. [0:13 – Skizze 1]

5.1.4 Diskussion

Bis auf S3 und S9 gehen die Befragten davon aus, daß die Vorgänge in der Galvanischen Zelle freiwillig und ohne vorheriges Aufladen ablaufen. Alle Schüler machen die Spannungsquelle als Ursache für die Prozesse in der Elektrolysezelle aus.

S3, S4 und S9 beginnen ihre Argumentationen ausgehend von der Feststellung, daß die Vorgänge bei der Elektrolyse "andersherum" sind als bei der galvanischen Zelle.

Besonders interessant ist die Beschreibung der Vorgänge als Laden-Entladen-Zyklus (s. Kap. 5.1.3). S3 stellt fest, daß die Energie, die bei der Elektrolyse an die Zelle abgegeben wird, bei der galvanischen Zelle wieder aus der Zelle entnommen werden kann. Dies entspricht zwar einem Laden-Entladen-Zyklus, ist aber mit der wissenschaftlich korrekten Beschreibung vereinbar. Das ist bei S9 nicht der Fall, da dieser Schüler – im Gegensatz zu S3 – davon ausgeht, daß die Prozesse in der galvanischen Zelle nur dann ablaufen können, wenn sie vorher aufgeladen wurde. Er übersieht, daß das System $\text{Zn}_{(s)} \mid \text{Zn}^{2+}_{(aq)} : \text{Cu}^{2+}_{(aq)} \mid \text{Cu}_{(s)}$ Energie enthält, die bei einer chemischen Reaktion umgesetzt werden kann. Seine Beschreibung erinnert an das Laden und Entladen eines Kondensators. Dieser speichert im geladenen Zustand aufgrund der Ladungstrennung Energie. Der Schüler setzt eine undurchlässige Trennwand voraus. Er sagt, daß die Elektroden bei einer durchlässigen Trennwand nicht aufgeladen werden können und nur, wenn die Elektroden geladen sind, kann die Zelle die Lampe betreiben. Die chemischen Reaktionen und die Verschiebung des Gleichge-

wichtiges stellen nur einen Mechanismus dar, der beschreibt, wie die Ladungen gespeichert werden. Diese Beschreibung ist mit der Vorstellung eines geschlossenen Stromkreises unvereinbar.

Eine wichtige Feststellung ist, daß das Interessante bei elektrochemischen Zellen nicht die Speicherung elektrostatischer Energie ist, sondern die Umsetzung von Energie bei chemischen Reaktionen an den Elektroden. In einer galvanischen Zelle wird die bei einer chemischen Reaktion frei werdende Energie in elektrische Energie umgewandelt. In einer Elektrolysezelle wird bei einer chemischen Reaktion elektrische Energie aufgenommen.

Stellungnahme 1: Energiespeicherung in elektrochemischen Zellen

5.2 Elektrodenreaktionen

Das Entscheidende bei elektrochemischen Vorgängen ist die räumliche Trennung zwischen Oxidationsreaktion und Reduktionsreaktion. Der Elektronenaustausch zwischen den beiden Teilreaktionen findet dabei durch den äußeren Stromkreis statt. Einige Schüler nehmen hingegen an, daß dieser Elektronenaustausch durch den inneren Stromkreis stattfindet (Kap. 5.2.1).

Aus naturwissenschaftlicher Sicht finden an den Elektroden Gleichgewichtsreaktionen statt. In zwei Interviews beschreiben Schüler Hin- & Rückreaktionen an den Elektroden (Kap. 5.2.2).

Einige Schüler gehen fälschlicherweise von einer direkten Verknüpfung zwischen der Polung der Elektrode und den dort stattfindenden Reaktionstypen aus (Kap. 5.2.3).

Die Ergebnisse der Interviews werden in Kap. 5.2.4 diskutiert.

5.2.1 Elektronenaustausch zwischen den Teilreaktionen

Die Schüler S3, S6, S7, S8, S9 und S10 gehen davon aus, daß die Elektronen zwischen den beiden in den Skizzen vorgegebenen Teilreaktionen durch den äußeren Stromkreis ausgetauscht werden.

[S10:] Ja, jedenfalls zerfällt hier Zink zu Zink 2+ Ionen und zwei Elektronen. Und diese beiden Elektronen [...] fließen jetzt [...] hier rüber. Die Lampe leuchtet dann.

[I:] **Hier rüber? [...] [Jetzt weiß ich] wo du hinzeigst, das höre ich nachher [auf der Aufzeichnung] nicht mehr. Darum**

[S10:] Ja gut, also dann, [...] ich würde sagen, der Stromfluß läuft von dieser Zinkelektrode durch das Kabel, durch die Lampe, die dann anfängt zu leuchten, in das Kupfer, dann passiert hier die Reaktion, daß .. Kupfer aus dieser Lösung mit diesen Elektronen wieder zu elementarem Kupfer wird. [0:05 – Skizze 1]

S8 geht zwar auch davon aus, daß die Elektronen zwischen den Teilreaktionen über den äußeren Stromkreis ausgetauscht werden, begründet es jedoch damit, daß die Elektronen nicht durch das Diaphragma gelangen können (s. Kap. 5.4.4). Er geht davon aus, daß der Weg durch die Lösung ansonsten leichter wäre als der durch den Widerstand im äußeren Stromkreis. Das folgende Zitat bezieht sich auf die Elektrolyse von Wasser ohne Verwendung eines Diaphragmas.

[S8:] [...] also der Weg [durch die Lösung] ist ja einfacher .. für das Elektron als [...] [der] über den Verbraucher. Glaube ich, weil da [...] der Verbraucher ja eigentlich auch ein Widerstand ist. [0:29]

Die Schüler S1 und S4 sagen hingegen, daß der Elektronenaustausch zwischen den Teilgleichungen über den inneren Stromkreis stattfindet.

S1 übersieht die Notwendigkeit eines Elektronenaustauschs zwischen den Elektroden zunächst. Nach einer Intervention durch den Interviewer beschreibt er dann für die galvanische Zelle, nicht jedoch für die Elektrolysezelle, einen Elektronenaustausch zwischen den Teilreaktionen (s. Kap.5.2.2.1).

Die Annahme, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis ausgetauscht werden, ist in den Vorstellungen des Schülers (S1) über den äußeren Stromkreis begründet und ist daher Teil einer anderen 'Geschichte' (s. Kap. 5.3.2.3).

S4 beschreibt zwar von sich aus für beide Zellen einen Elektronenfluß durch den äußeren Stromkreis. Dieser dient jedoch nur dazu, den Stromkreis zu schließen. Er steht in keinem direkten Zusammenhang mit den Elektrodenreaktionen, deren Elektronenaustausch durch die Lösungen stattfindet.

[S4:] Hier läuft auch die Reaktion ab [...]. Aus diesem festen Zink, [...] das ist zweifach positiv hinterher geladen [Zinkelektrode], daß heißt, es gibt zwei Elektronen ab. Es entsteht also ein Stromfluß [...], also es fließen Elektronen. [...] Das Kupfersulfat, also hier dieses positiv geladene Kupfer [aus der Lösung] [...] nimmt [...] diese Elektronen auf und lagert sie dann hinterher an dem Kupfer an. Also, es entsteht ein Stromkreislauf in [...] die Richtung [...]

Auf jeden Fall [...] werden [...] diese zwei Elektronen, die aus diesem Zink [...] ausgefällt werden [...] würden auf jeden Fall [...] hier sich so anlagern [...] an diesem Kupfersulfat. [0:03 – Skizze 1]

[S4:] [Skizze 1] Also, da hinten [Zinkelektrode] entstehen Elektronen [...] und positiv geladenen Zink-Kationen.

[I:] [...] **Was passiert dann mit den Elektronen?**

[S4:] Die Elektronen, [...] wandern zur Kupferelektrode .. und die

[I:] **Welchen Weg nehmen sie da?**

[S4:] Die nehmen den Weg durch die Lösung, [...] durch das Diaphragma zur Kupferelektrode und von da aus nehmen sie wieder den Weg über den Leiter, durch den Verbraucher zur Zinkelektrode.

[I:] **Können wir das gleiche noch mal für die zweite Zeichnung tun? [Skizze 2]**

[S4:] Ja, bei der zweiten Zeichnung [– bei der Elektrolyse –] sieht das [so] aus, [...] daß von der Kupferelektrode aus die Elektronen durch das Diaphragma durch die Lösung zu dem Zink wandern und von dem Zink über den Leiter ja zur Kupferelektrode. [0:57 – Skizze 1 &2]

[S4:] [Skizze 2] die Elektronen kommen zum Zink und durch diesen geschlossenen Kreislauf. Diese Elektronen müßten eigentlich innerhalb [äußerer Stromkreis] weiter wandern, damit [...] dieser Stromkreislauf geschlossen wird. [0:23 – Skizze 2]

Bei der Beschreibung von S2 läßt sich nicht wirklich von einem Elektronenaustausch zwischen Teilreaktionen sprechen (s. Kap. 5.3.2.1)

5.2.2 Chemisches Gleichgewicht

S1 und S9 beschreiben die Vorgänge an den Elektroden unter der Berücksichtigung von Hin- und Rückreaktionen. Die Tatsache, daß chemische Reaktionen nicht nur in einer Richtung ablaufen, wird in der Schule im Zusammenhang mit dynamischen Gleichgewichten thematisiert. Für die Beschreibung der Elektrodenreaktionen durch die Schüler hat dies interessante Konsequenzen, die nun im einzelnen beschrieben werden.

5.2.2.1 Verschleierung der Notwendigkeit eines Elektronenaustausches

S1 beschreibt die Elektrodenreaktionen als Hin- und Rückreaktionen. Dabei kann eine der beiden Reaktionen überwiegen, wenn die andere langsamer ist.

Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Reaktionen werden dabei auf "Tensionen" der Elemente zurückgeführt. Bei dem Element mit größerer "Abscheidungstension" nehmen die Kationen in größerem Maße Elektronen auf als die entsprechenden Atome Elektronen abgeben. Bei dem Element mit der größeren "Lösungstension" geben Atome, die Teil der Elektrode sind, schneller

Elektronen ab und gehen als Ion in die Lösung, als die entsprechenden Kationen Elektronen aufnehmen können (s. Kap. 5.1).

- [S1:] [Skizze 1] Kupfer hat eine höhere Abscheidungstension, das heißt, daß Kupfer $2+$ sich im größeren Maße aus der Lösung löst als Kupfer Atome sich von diesem Stab hier lösen. Das heißt Kupfer $2+$ plus zwei Elektronen wird zu Kupfer.
Zink hat eine größere Lösungstension. War das jetzt richtig? – Wir hatten immer diese Tabelle mit den Elementen, wo wir draus erkennen konnten welches Element welche Tension hat. Aber ich schätze mal, das ist so.
Und Zink hat eine größere Lösungstension, Es geht schneller in Lösung, als Zn^{2+} Elektronen aufnimmt. Zink wird sozusagen zerlegt, es gibt zwei Elektronen ab und wird zu Zink $2+$ und zwei Elektronen werden abgegeben. [0:03 – Skizze 1]

Trotzdem beschreibt der Schüler keinen Elektronenaustausch mit der Umgebung. Dieser wird durch die Beschreibung der Elektrodenreaktionen als Hin- und Rückreaktionen verschleiert. Erst nach einer Intervention durch den Interviewer sieht der Schüler die Notwendigkeit eines Elektronentransfers.

- [S1:] [Skizze 2] Ja, Kupferkationen aus der Lösung nehmen Elektronen schneller auf – in größerem Maße auf – als die Kupferatome aus der Elektrode sie abgeben. Also ist der Vorgang an der Elektrode langsamer als der in der Lösung.
- [I:] **Wenn die Kupferteilchen Elektronen aufnehmen – wo kommen die dann her? Also wieder die Frage: Wenn ich etwas aufnehme, dann muß ich es ja irgendwo her nehmen.**
- [S1:] Ja, von dieser Kupferelektrode, von den Kupferatomen, Ja ... obwohl ... das ist ... mh Wenn die dann schneller Elektronen – also in größerem Maße Elektronen gebrauchen als die Kupferatome sie abgeben können, dann müssen sie ja auch aus irgendeiner anderen Quelle kommen. Finde ich, weil sonst haben die Kupferkationen ja nicht so viele Elektronen parat. Weil die Kupferatome sie eben nicht so schnell abgeben können.
- [I:] **Kannst du den Gedanken mal weiterspinnen – den finde ich gerade interessant.**
- [S1:] Ja, dann müssen die Elektronen, die die Kupferatome brauchen, um zum Atom zu werden ... in der Lösung schon vorhanden sein. Ja, sonst würden sich ja diese Tensionen ausgleichen. Dann würde Kupfer in genau so großem Maße Elektronen aufnehmen, wie Kupferatome sie abgeben können. Und da es ja offensichtlich nicht der Fall ist, müssen die ja wie hier in der zweiten Zeichnung aus der Stromquelle kommen – damit die Reaktionen schneller gehen – also so, wie eben diesen Tensionen sonst müssen sie dann in der Lösung sein.
- [I:] **Noch mal zu meinem Verständnis: Hier [Skizze 2] kommen die Elektronen, die da sind aus diesem Gerät [Spannungsquelle]**
- [S1:] Ja.
- [I:] **– das da hier oben daran geschaltet wird. Und in der anderen Zeichnung [Skizze 1] im Vergleich dazu?**
- [S1:] Ja, ich frage mich nur: hier die Lampe ist ja mit keiner Stromquelle verbunden – oder? Die ist nur mit diesen Elektroden verbunden?
- [I:] **Ja.**
- [S1:] Ja, dann müssen sich hier [Skizze 1] in der Lösung Elektronen befinden. ... Ja.
- [I:] **Wenn wir die andere Seite [Skizze 1 / Zinkhalbzelle] mal betrachten. Korrigiere mich, wenn ich etwas sage, was du so nicht meinst. Da sieht es ja so aus, als würde das Zink da Elektronen abgeben.**

[S1:] Mh ... wie jetzt?

[I:] **Oder...**

[S1:] Ja hier ist es ja auch so, daß Zink Elektronen sowohl abgibt als auch aufnimmt. Das heißt Zink gibt ja Elektronen ab und Zink-Kationen nehmen sie auf. Ja, nur ist hier die Tension anders rum. Hier ist es so, daß Zink sich – das Zink die Elektronen schneller abgibt als Zink-Kationen sie aufnehmen können. Hier würde sich das ganze ganz gut erklären und, ja, dann ... dann könnte man das auch mit dem Kupfer erklären, glaube ich. Dann nehmen Kupferkationen diese fehlenden Elektronen von der Zinksulfatlösung, weil die werden ja vom Zinkkation nicht so schnell gebraucht wie vom Kupferkation. Und dann würde sich das alles erklären.

[I:] **Kannst du dann den Weg der Elektronen mal beschreiben?**

[S1:] Ja!

[I:] **Wenn du sagst, das eine nimmt die von dem anderen.**

[S1:] Ja, das heißt fünf Zinkatome scheiden dann zehn Elektronen ab. Und die werden dann nur von einem Zinkkation gebraucht zum Beispiel. Dann bleiben noch acht über. und die gehen – also ein Teil geht zum Zinkkation hier [Skizze 1: er zeichnet einen Pfeil von der Zinkelektrode zu dem Zn der Beschriftung 'ZnSO₄-Lsg.' in der Skizze]

[I:] **Also der Pfeil steht jetzt für Elektronen?**

[S1:] Ja, ja, zum Beispiel hier von [er verlängert den Pfeil, bis zu dem Zn, welches er selbst in die Elektrode eingezeichnet hat.]. In meinem Beispiel die acht bleiben ja noch über und die können ja [...] von vier Kupferkationen zum Beispiel aufgenommen werden. Das heißt, ich denke mal Kupfer diffundiert dann auf die linke Seite. Und – ja, wird von diesen Elektronen angezogen nimmt sie auf [Skizze 1 / Pfeile durch das Diaphragma: " $8e^- \rightleftharpoons Cu^{2+}$ "] und wird dadurch zum Kupferatom. Ja, das klingt jetzt alles logisch.

[I:] **Das heißt, an welcher Stelle – also wo in der Zelle nimmt das Kupfer die Elektronen auf?**

[S1:] Ja, da bin ich mir nicht so ganz sicher. Also, wenn diese acht Elektronen hier drin sind – in der linken Seite [...] und Kupferkationen in der rechten, dann werden sie voneinander angezogen. Nur, ob jetzt die acht Elektronen zum Kupfer gehen oder Kupfer zu den acht Elektronen, das ist hier die Frage. [0:48 – Skizze 1 & 2]

5.2.2.2 Verschiebung des Gleichgewichtes durch Elektronenaustausch

S9 spricht von einer Gleichgewichtsreaktion zwischen der Lösung und der Elektrode. Er beschreibt "Hin- und Herreaktion", die ständige Bewegung bedeuten.

[S9:] Das [sind] also immer diese Reaktionen [...] das ist ja immer in einem Gleichgewicht und das geht dann in Sekundenbruchteilen, daß sich zwischendurch Kupfer bildet und dann wieder auflöst. Das ist also praktisch nicht zu merken. [0:20 – Skizze 2a]

[S9:] wenn da so ein Gleichgewicht ist, das [ist] ja [...] eine Hin- und Herreaktion. [0:21 – Skizze 2a]

Bei der Hinreaktion werden Elektronen an die Lösung abgegeben, die sogleich die Rückreaktion auslösen. Ein Elektronenaustausch mit dem Draht führt jedoch zu einer Verschiebung des Gleichgewichtes.

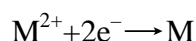
[S9:] Und nur wenn die Elektronen jetzt ja praktisch durch den Draht weggezogen werden – zum Kupfer, [...] dann [...] überwiegt [...] erst eine Reaktion. [0:25 – Skizze 2a]

In einer der anderen 'Geschichten' wird sich zeigen, welche Auswirkungen die Beschreibung von chemischen Gleichgewichten bei S9 für seine Vorstellungen über den Leitungsmechanismus im Elektrolyten hat (s. Kap. 5.4.2).

Wie aus Kap. 5.1.3 hervorgeht, beschreibt S9 einen Zyklus bestehend aus einem Ladevorgang und einem Entladungsvorgang:

i) Ladevorgang (S9)

Die Quelle gibt Elektronen an die eine Halbzelle ab. Das führt zu einer Verschiebung des Gleichgewichtes in Richtung des Metalls in dieser Halbzelle.



Dadurch wird in dieser Halbzelle ein Überschuß an M im Vergleich zu M^{2+} erzeugt. Das M ist zwar nicht negativ geladen, kann aber Elektronen freisetzen. Die Elektrode kann also Elektronen abgeben und ist daher der Minuspol.

[S9:] Hier wird also der Strom angelegt. Die Elektronen werden dem Zink zugeführt [Pfeil von der Spannungsquelle zu der Zinkelektrode beschriftet mit "2e⁻"] [...] Hier entsteht also Zink .. im Überschuß. [0:29 – Skizze 2b]

Der anderen Halbzelle entzieht die Quelle Elektronen. Dadurch verschiebt sich das Gleichgewicht in Richtung der Metallionen.



Es entsteht ein Überschuß von M^{2+} im Vergleich zu M. Die M^{2+} können Elektronen aufnehmen. Die Elektrode ist positiv.

[S9:] Die Elektronen werden vom Kupfer angenommen, also abgezogen. Also findet am Kupfer eigentlich die andere [im Vergleich zur Zinkelektrode] Reaktion statt. Also, so Kupferionen in die Lösung gehen.[...] Und dadurch wird das Ganze geladen. Hier wird also eine positive Ladung aufgebaut – an der Kupferelektrode. [0:29 – Skizze 2b]

ii) Entladungsvorgang (S9)

Die gestörten Gleichgewichte an den Elektroden stellen sich wieder ein. Dies geschieht durch einen Elektronentransfer durch den äußeren Stromkreis. An der negativen Elektrode reagiert der Überschuß an M und an der positiven Elektrode der Überschuß an M^{2+} ab.

[S9:] Die Zinkelektrode ist negativ geladen und die Kupferelektrode ist positiv geladen .. und dadurch, daß jetzt der Stromkreis geschlossen wird, wird an der Zinkelektrode /
 Also an der Zinkelektrode ist das Gleichgewicht aus dem Gleichgewicht gebracht – so zu sagen. Das heißt, wir haben einen Überschuß an Zink – im Vergleich zu Zink $2+$ Ionen. Das heißt, das Zink dissoziiert zu Zink $2+$ und gibt dabei Elektronen ab.
 Diese Elektronen gehen durch diese Leitung, also auch durch die Lampe zur Kupferelektrode.
 An der Kupferelektrode haben wir, ja, ist das Gleichgewicht eben auch durcheinander, dadurch, daß wir mehr Kupfer $2+$ haben. In der Lösung allerdings. Und zu wenig Kupfer, wenn man das im Gleichgewicht sieht. Dadurch [...], daß Elektronen jetzt ankommen, kann also das Kupfer $2+$ [...] zu Kupfer werden.
 Ja und das ist ja praktisch auch ein Elektronensog – mehr oder weniger. Die Zinkelektrode will die Elektronen abgeben. Und die Kupferelektrode braucht Elektronen, also fließt der Strom. [0:35 – Skizze 1]

iii) Ungeladener Zustand (S9)

Haben sich die Gleichgewichte an den Elektroden wieder eingestellt, finden an den Elektroden nur noch Hin- und Rückreaktion statt ($M^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons M$). Dabei werden durch den äußeren Stromkreis keine Elektronen ausgetauscht.

[S9:] Die Ladung geht ganz schnell wieder gegen Null. Also wenn die Zinkelektrode ausreichend negative Ladung abgegeben hat – in Form von e^- [...] ist [sie] ja wieder praktisch nicht geladen. Und hier findet wieder dieser kleine Kreislauf für sich statt. Also Zink dissoziiert und wird wieder zu Zink und hin und her. Und an der Kupferelektrode das gleiche, wenn die genug Elektronen wieder aufgenommen haben, um diese positive Ladung auszugleichen, ist auch wieder das Gleichgewicht hergestellt. Und dann reagiert eben Kupfer wieder zu [...] Kupfer $2+$ Ionen und umgekehrt. So, für sich. [0:32 – Skizze 1]

5.2.3 Verknüpfung von Reaktionstyp und Polung der Elektrode

Die Schüler S1, S2, S3, S4, S7, S10 beschriften beide Skizzen derart, daß an gleich geladenen Elektroden auch die gleichen Reaktionstypen ablaufen.

S2, S3, S4, S10	S1, S2
Reduktion am Minuspol,	Oxidation am Minuspol,
Oxidation am Pluspol	Reduktion am Pluspol

Tabelle 11: Zusammenhang zwischen der Ladung der Elektrode und der Elektrodenreaktion

Dies wird von S3 begründet:

[S3:] Wenn man sich hier die [...] [Pfeil, von der rechten Reaktionsgleichung auf Skizze 1 zur linken Reaktionsgleichung auf Skizze 2 geht, wenn man die Skizzen entsprechend nebeneinander legt], wenn man sich die beiden Reaktionen anguckt, dann ist es im Prinzip klar – finde ich. Wenn man Kupfer $2+$ plus zwei e^- zu Kupfer null solid hat, und auf der Elektrolyse Zink $2+$ plus zwei e^- wird zu Zink null solid dann ist es eigentlich verständlich, daß das im Prinzip das gleiche ist – oder?

[I:] **Das es also beide Male der**

[S3:] Minuspol ist. [0:56 – Skizze 1 & 2]

[S3:] So, und auch [...] [hier] sehe ich, daß das das gleiche ist [Pfeil, von der rechten Reaktionsgleichung auf Skizze 2 zur linken Reaktionsgleichung auf Skizze 1]. [...] Also, für mich [ist es] rein logisch [, daß das] für die Plus- und Minuspoldefinition das gleiche ist. Ob das chemisch jetzt das gleiche ist, [...] aber von der elektrochemischen Betrachtung ist das für mich das Gleiche. [0:56 – Skizze 1 & 2]

S8 beschriftet die beiden Zellen unterschiedlich:

galvanische Zelle	Elektrolysezelle
Oxidation am Minuspol, Reduktion am Pluspol	Reduktion am Minuspol, Oxidation am Pluspol

Tabelle 12: Zusammenhang zwischen der Ladung der Elektrode und der Elektrodenreaktion (S8)

5.2.4 Diskussion

Die in den Interviews auftretende Vorstellung, daß der Elektronenaustausch zwischen der Oxidation und der Reduktion durch den inneren Stromkreis stattfindet, wird auch von MAROHN (1999) beschrieben.

Die Tatsache, daß in der Oxidationsreaktion Elektronen freigesetzt und im Reduktionsvorgang Elektronen aufgenommen werden, wurde als Hinweis darauf betrachtet, daß sich diese Elektronen von der einen Elektrode zur anderen durch die Lösung bewegen müssen.

(MAROHN, 1999, Seite 84)

Wie sich in Kapitel 5.3.2.3 zeigen wird, resultiert diese Vorstellung bei S1 daraus, daß für diesen Schüler ein Elektronenfluß im äußeren Stromkreis eine ganz andere Bedeutung hat als im inneren Stromkreis. Für den äußeren Stromkreis kommen die Vorstellungen des Schülers über Physik zur Anwendung, während er für den inneren Stromkreis seine Vorstellung über Chemie anwen-

det. Ein 'chemischer' Elektronenaustausch durch den äußeren Stromkreis kommt daher für den Schüler nicht in Betracht.

Die oben beschriebene Problematik wird in Stellungnahme 6 und Stellungnahme 7 wieder aufgegriffen.

S2 und S9 beschreiben die Vorgänge an den Elektroden unter Berücksichtigung von Hin- und Rückreaktionen. Das ist komplizierter als die Betrachtung von Reaktionen in nur einer Richtung. Daher kann es zu Kommunikationsschwierigkeiten kommen. Außerdem kann man beispielsweise annehmen, daß die Elektronen, die bei der Hinreaktion aufgenommen werden, aus der Rückreaktion kommen und umgekehrt. Daß Elektronen mit der Umgebung ausgetauscht werden müssen, wenn eine der beiden Reaktionen überwiegt, wird von S1 daher zunächst übersehen. Der Schüler geht zwar davon aus, daß eine Elektronenaufnahme nicht ohne gleichzeitige Elektronenabgabe stattfinden kann, beschreibt aber im Endeffekt genau diesen Vorgang, weil er, durch die umständliche Beschreibung von Gleichgewichtsprozessen, den Überblick verliert.

GARNETT & TREAGUST beschreiben, daß einige Schüler davon ausgehen, daß Oxidations- und Reduktionsreaktionen unabhängig voneinander auftreten können.

Misconception 7. Oxidation and reduction processes can occur independently.

(GARNETT & TREAGUST, 1992a)

S1 macht genau diesen Fehler, obwohl er die entsprechende Vorstellung nicht teilt.

Die Beschreibung von Hin- und Rückreaktionen an den Elektroden kann unübersichtlich sein und daher zu Fehlern führen.

Stellungnahme 2: Unübersichtlichkeit durch die Beschreibung von Hin- und Rückreaktionen

MAROHN stellt fest, daß die meisten Schüler von den Elektronenübergängen an den Elektroden auf deren Ladung schließen.

Die Schülerkommentare zeigten, daß die Mehrheit der Schüler von den an den Elektroden stattfindenden Elektronenübergängen auf die Ladungen der Elektroden schließt.

(MAROHN, 1999, Seite 128)

Entsprechend gehen die meisten Befragten in den Interviews davon aus, daß an gleich geladenen Elektroden auch die gleichen Reaktionstypen ablaufen. Das ist aus naturwissenschaftlicher Sicht nicht korrekt. So findet beispielsweise am Minuspol einer galvanischen Zelle eine Oxidation, am Minuspol einer Elektrolysezelle hingegen eine Reduktion statt.

Wenn man die Zinkelektrode der beiden Zellen in Skizze 1 und 2 miteinander vergleicht, fällt auf, daß an derselben Elektrode, die in beiden Fällen negativ geladen ist, einmal (Skizze 1) eine Oxidation und einmal (Skizze 2) eine Reduktion stattfindet. Dies wird erst dann verständlich, wenn man sich klar macht, daß bei der galvanischen Zelle (Skizze 1) die negative Ladung an der Zinkelektrode durch die chemische Reaktion aufrechterhalten wird. Bei der Elektrolysezelle (Skizze 2) hingegen wird die Ladung von der Spannungsquelle vorgegeben. Hier findet die chemische Reaktion statt, weil die Zinkelektrode negativ geladen ist.

Das Problem wird besonders deutlich, wenn man nur ausgehend von der Spannung, die an der Zelle anliegt, herausfinden will, ob es sich um eine galvanische Zelle oder um eine Elektrolysezelle handelt. Die Polung der Elektroden läßt darüber keinen Aufschluß zu. Allein der Betrag der Spannung ist entscheidend: ist er größer als die Gleichgewichts-EMK der Zelle, so handelt es sich um eine Elektrolysezelle, ist er gleich der Gleichgewichts-EMK, so fließt in dem System kein Strom, und ist der Betrag der Spannung kleiner als die Gleichgewichts-EMK, so liegt eine galvanische Zelle vor.

An zwei identischen Elektroden, die die gleiche Ladung tragen und sich nur dadurch voneinander unterscheiden, daß die eine mit einer Lampe und die andere mit einer Spannungsquelle verbunden ist, laufen unterschiedliche Reaktionen ab. Diese Tatsache stellt ein erhebliches Problem beim Erlernen der Elektrochemie dar. Wenn man sich klar macht, daß das eine Mal die chemische Reaktion die Ladung der Elektrode aufrecht hält und das andere Mal die Ladung die chemische Reaktion bewirkt, könnte diese Tatsache verständlich werden.

Stellungnahme 3: Unterschiedliche Reaktionen an Elektroden mit der gleichen Ladung

5.3 Elektrizitätslehre

In Kapitel 2.3 sind Ergebnisse der physikdidaktischen Forschung über Schülervorstellungen zur Elektrizitätslehre zusammengefaßt.

Im folgenden wird beschrieben, welche Vorstellungen aus der Elektrizitätslehre sich in den Interviews zur Elektrochemie wiederfinden und welche Konsequenzen sich daraus für das Verstehen der Elektrochemie ergeben (Kap. 5.3.1 und Kap. 5.3.2). Konsequenzen sind beispielsweise die Beschreibung der Vorgänge in den Zellen als *zeitliche Abfolge* (Kap. 5.3.2.1), sowie die falsche Annahme, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis von einer Elektrode zur anderen transportiert werden (Kap. 5.3.2.2). Die Folgen der *Stromverbrauchsvorstellung* in den Interviews werden in Kap. 5.3.2.3 beschrieben.

In Kapitel 5.3.3 werden die Ergebnisse diskutiert.

5.3.1 Vorstellungen aus der Elektrizitätslehre in der Elektrochemie

Einige Schüler äußern zu Beginn des Interviews, daß ihnen Grundwissen aus der Physik für das Verstehen von Elektrochemie als notwendig erscheint.

[I:] **Gibt es was, wo du meinst, das müßte man genauer erklären? Es kann ja sein, daß du da sitzt, im Unterricht, und denkst, da hätte ich gerne ein bißchen mehr zu gehört.**

[S10:] Ja, [...] ich glaube, man hätte vielleicht mehr wissen müssen hinsichtlich Physik, vielleicht Strom im Allgemeinen. Also, daß man mehr Verständnis dafür gewinnt, wie das überhaupt funktioniert mit den Elektronen in den Kabeln und so weiter und so fort. Wie das praktisch abgeht. Wir haben da immer nur [...], unsere Reihenfolge war immer so, daß da irgendwie was passierte, dann eine Differenz zustande kam und deswegen Strom floß. Und [...] man konnte das Ganze nicht ganz so gut nachvollziehen, fand ich. Also da war [...] Vorwissen auch ziemlich wichtig. [...] die Leute, die jetzt noch Physik haben, die konnten das auch eindeutig besser. [0:03]

Alle befragten Schüler argumentieren über den Strombegriff. Wenn der Begriffsname 'Spannung' verwendet wird, so werden ihm Eigenschaften zugeordnet, die sich in weiten Teilen mit denen des Strombegriffs decken.

Obwohl auch bei den Argumentationen von S10 der Strombegriff vorherrscht, spricht dieser von Potentialen, die klar vom Strombegriff unterschieden werden (s. Kap. 5.1.1).

Für S1, S3, S4, S6, S7 und S10 ist nur der Fluß von Elektronen ein elektrischer Strom.

[S7:] Wenn Strom fließt, dann [...] fließen Elektronen vom Minus- zum Pluspol. [1:02]

S3, S4 und S10 gehen davon aus, daß der Stromkreis geschlossen sein muß.

[I:] **Was muß denn das [Diaphragma] leisten, unterm Strich – egal, wie es das macht?**

[S3:] Was es leisten muß, ist auf jeden Fall, daß der Stromkreis geschlossen ist. Das heißt, daß Elektronen transferiert werden auf die andere Seite. Das ist das, was geleistet werden muß, ansonsten funktioniert es nicht. [0:30 – Skizze 2]

S7 sagt, daß die Stromquelle in Skizze 2 einen geschlossenen Stromkreis verlangt. In Skizze 1 muß der Stromkreis nicht geschlossen sein, da dort keine Stromquelle vorhanden ist.

S2 zieht bei mehreren möglichen Beschreibungen diejenige vor, die einem geschlossenen Stromkreis entspricht.

Von einer konventionellen Stromrichtung sprechen S2 und S4.

S2 schließt aus der Tatsache, daß Feldlinien von Plus nach Minus verlaufen, darauf, daß auch Elektronen von Plus nach Minus fließen. S4 sagt, daß Elektronen von Minus nach Plus wandern und begründet es damit, daß gleiche Ladungen sich abstoßen und ungleiche Ladungen sich anziehen. Die "genormte Stromrichtung" verläuft jedoch nach seinen Angaben andersherum.

Die *Stromverbrauchsvorstellung* (s. Kap. 2.3.2) spielt bei den Interviews mit S1, S4 und S10 eine Rolle.

5.3.2 Konsequenzen für die Elektrochemie

5.3.2.1 Beschreibung einer zeitlichen Abfolge

Die aus der Physikdidaktik bekannte *lokale Argumentation* (s. Kap. 2.3.5) führt dazu, daß einige Schüler (S2, S4, S10) eine zeitliche Abfolge beschreiben, bei denen eine Ladung durch die Zelle gereicht wird.

Bei dem Interview mit S4 geht dieser Beschreibung eine Frage voran, die den Schüler in Richtung dieser Argumentationsweise beeinflußt haben kann (s. Kap. 4.2.3.1):

[I:] **Kannst du das Schicksal eines Elektrons mal beschreiben?** [0:22 – Skizze 2]

Eine solche Frage wurde in den Interviews mit S2 und S10 nicht gestellt.

i) Die lokale Beschreibung der Vorgänge in den Zellen

S2 beschreibt eine zeitliche Abfolge, die damit beginnt, daß eine der Elektroden eine Ladung trägt. Bei der galvanischen Zelle entsteht diese Ladung durch eine 'Reaktion'³⁹, bei der Elektrolysezelle wird die Elektrode durch die Stromquelle aufgeladen. Dies stellt den Startpunkt der Abfolge dar. Danach wird die

³⁹ Den Begriffsnamen 'Reaktion' benutzt dieser Schüler sehr allgemein, er steht nicht immer für eine chemische Reaktion.

Ladung von einem Teil (Elektrode, Lösung) zum nächsten durch die Zelle gereicht. Ursache dafür ist das Streben nach Neutralität.

[S2:] So Teilchen haben immer das Bestreben, einen Körper zu neutralisieren. Also positive und negative Ladung .. im Gleichgewicht zu halten. [0:39 – Skizze 1]

Im Verlauf einer solchen Abfolge tragen die angegebenen Teile der Zelle folglich entweder die als Startpunkt vorgegebene Ladung, die vom Schüler willkürlich mal als positiv und mal als negativ angenommen wird, oder sie sind neutral. Dabei werden die Elektroden und die Lösungen als Ganzes geladen oder entladen. Die Abfolge ist dann beendet, wenn jeder Teil der Zelle wieder neutral ist.

Der Schüler beschreibt für dieselbe Zelle unterschiedliche Abfolgen, die sich durch die Wahl des Startpunktes voneinander unterscheiden. Tabelle 13 beinhaltet zwei von S2 beschriebene Abfolgen für die galvanische Zelle:

Beispiel 1

- Irgendwie wandern $2e^-$ von der Kupferelektrode in die Lösung. Die Kupferelektrode wird positiv, die Kupfersulfatlösung negativ. (Startpunkt)
- $2e^-$ wandern durch die Lampe von der Zinkelektrode zur Kupferelektrode, um diese zu neutralisieren.
- Dabei wird die Zinkelektrode positiv – es ist ein Überschuß an Zn^{2+} -Ionen in der Zinkelektrode.
- Die Zinksulfatlösung spaltet sich auf und etwas setzt sich an die Elektrode heran oder Zn^{2+} geht in die Lösung, um die Elektrode zu neutralisieren. Dabei wird die Zinksulfatlösung positiv.
- Die Kupfersulfatlösung ist negativ, die Zinksulfatlösung ist positiv. Elektronen wandern durch die Membran von der Kupfersulfatlösung in die Zinksulfatlösung.
- Beide Lösungen sind wieder neutral. (Endpunkt)

Beispiel 2

- Die Kupferelektrode wird durch $2e^-$, von der Zinkelektrode, negativ. Dabei wird die Zinkelektrode positiv (Startpunkt).
- Cu^{2+} -Teilchen aus der Kupfersulfatlösung setzten sich an die Kupferelektrode.
- Die Kupferelektrode wird wieder neutral, die Kupfersulfatlösung negativ.
- Die positive Zinkelektrode gibt Zn^{2+} an die Lösung ab, sie wird neutral.
- Die Zinksulfatlösung wird positiv.
- Die Kupfersulfatlösung ist negativ, die Zinksulfatlösung ist positiv. Elektronen wandern durch die Membran von der Kupfersulfatlösung in die Zinksulfatlösung.
- Beide Lösungen sind wieder neutral. (Endpunkt)

Tabelle 13: Beschreibung einer zeitlichen Abfolge für die galvanische Zelle (S2)

Die folgenden Zitate sind Auszüge aus den Abfolgen in Tabelle 13.

Beispiel 1:

[S2:] Irgendwie sind beim Kupfersulfat die zwei e^- [...] da rein gewandert, also zur Lösung [Skizze 1 Pfeil, der von der Elektrode in die Lösung zeigt], haben sie sich mit der Lösung reagiert. Dann ist ja dieser Pol positiv geworden [Kupferelektrode]. Und dann sind diese zwei e^- Elektronen hierüber gewandert.

[I:] Vom Zink.

[S2:] Ja, genau, weil das war ja positiv [Kupferelektrode]. Um einen Ausgleich zu schaffen. Und dadurch hat sich irgendwie ein Stromkreis gebildet. Und diese Flüssigkeit [Kupfersulfatlösung] war, glaube ich, dann – da sich ja die zwei e^- – war dann wieder negativ und die haben sich dann mit der Zinksulfat auch noch verbunden. Dann war das wohl so ein Fluß. [0:09 – Skizze 1]

Beispiel 2:

[S2] Also, ich habe ja gerade gesagt, daß die [...] Kupferkathode [sich] im neutralen Zustand befindet. Einmal mit positiven Kupfer Teilchen und einmal mit negativen Elektronen. Also neutral ist. Da sie jedoch von der Zinkkathode negativ aufgeladen wird. Das bedeutet, daß negative Elektronen [...] sich an die Kupferkathode / ja, kommen hinzu. Also ist sie negativ aufgeladen und hat das Bestreben, ... [...] neutral zu werden [...], die Kupferkathode [...]. [Daraus folgt,] daß sich positive Teilchen aus dem Kupfersulfat da ransetzen. [...] Also wäre dann das Kupfersulfat negativ. Und [...] bei der Zinkkathode haben wir jetzt ja weniger Zinkelektronen Also geht das Zink $2+$ [...] in die Zinklösung zurück [...]. [0:40 – Skizze 1]

Aus diesen Beispielen wird ersichtlich, daß die Elektroden je nach Wahl des Startpunktes positive oder negative Ladungen tragen können, bevor sie wieder neutral werden. Diese Ladungen sind willkürlich. Daher erfolgt die Beschriftung der Skizzen mit Pluspol und Minuspol nicht ausgehend von der beschriebenen Abfolge (s. Kap.5.7.2.1).

Der Startpunkt ist das Aufladen einer Elektrode. Dies geschieht bei der galvanischen Zelle durch die Teilung einer Ladung und bedeutet somit das gleichzeitige Aufladen einer Lösung (Tabelle 13 – Beispiel 1) oder der anderen Elektrode (Tabelle 13 – Beispiel 2).

Bei der Elektrolysezelle ist es die Quelle, die die Elektroden auflädt und somit die Abfolge auslöst.

Zunächst geht der Schüler davon aus, daß die Quelle am negativen Anschluß negative Elektronen (e^-) und am positiven Anschluß positive Elektronen (e^+) abgibt (Tabelle 14 – Beispiel 3). Später beschreibt er, daß der positive Anschluß der Elektrode Elektronen aufnimmt (Tabelle 14 – Beispiel 4).

Beispiel 3:

Der Schüler legt willkürlich fest, daß die Zinkelektrode an den Pluspol der Quelle angeschlossen ist.

- Die Zinkelektrode erhält vom Pluspol der Quelle e^+ und wird positiv, die Kupferelektrode erhält von Minuspol der Quelle e^- und wird negativ. (Startpunkt)
- Negative Teilchen aus der Zinksulfatlösung setzen sich an die Zinkelektrode heran, die dabei neutral wird. Positive Teilchen aus der Kupfersulfatlösung neutralisieren die Kupferelektrode.
- Die Zinksulfatlösung wird positiv, die Kupfersulfatlösung wird negativ.
- Elektronen wandern von der negativen zur positiven Lösung durch die Membran.
- Beide Lösungen sind neutral. (Endpunkt)

Beispiel 4:

Der Schüler schließt nach einer Intervention durch den Interviewer⁴⁰ aus den vorgegebenen Reaktionsgleichungen, daß die Zinkelektrode mit dem negativen Pol der Quelle verbunden ist.

- Die Zinkelektrode erhält Elektronen von der Quelle, sie wird negativ geladen. (Startpunkt)
- Positive Teilchen aus der Zinksulfatlösung setzen sich an die Zinkelektrode heran. Die Zinkelektrode wird neutral, die Zinksulfatlösung negativ.
- Aus der Kupfersulfatlösung wandern positive Teilchen durch die Membran in die Zinksulfatlösung. Die Zinksulfatlösung wird neutral, die Kupfersulfatlösung negativ.
- Aus der neutralen Kupferelektrode wandern Cu^{2+} in die Kupfersulfatlösung. Die Kupfersulfatlösung wird neutral, die Kupferelektrode negativ.
- Negative Teilchen wandern von der Kupferelektrode zum Pluspol der Quelle. (Endpunkt)

Tabelle 14: Beschreibung einer zeitlichen Abfolge für die Elektrolysezelle (S2)

Die folgenden Zitate sind Auszüge aus den Abfolgen in Tabelle 14.

Beispiel 3:

[S2:] Und dann würde die Zinkkathode, da sie ja an den Pluspol [der Quelle] angeschlossen ist, positiv aufgeladen werden. [...] Die Zinksulfatlösung müßte sich dann aufspalten und die negativen Teilchen [...] dieses Sulfats setzen sich dann an die Zinkkathode heran, damit sie wieder neutralisiert wird. Bei der Kupferkathode ist es genau andersherum. Die lädt sich negativ auf und dann müßten sich positive Teilchen des Kupfersulfats hier dran setzen. Und dann wäre [...] das Kupfersulfat [...] auf eine bestimmte Weise negativ wegen den Teilchen – [...] positiven Teilchen –, die sich an die Kupferkathode heran gesetzt haben [...] das [Kupfersulfatlösung] wäre dann negativ. Und das Zinksulfat wäre ja im Gegenzug positiv. Und dann könnte [...] hier [zwischen den Lösungen] auch ein Austausch stattfinden. Um wieder diese Flüssigkeit neutral zu halten. Weil, das ist ja auch immer der Sinn. Diese Flüssigkeiten [...] neutral zu halten. [0:16 – Skizze 2]

⁴⁰ Der Interviewer bringt den Schüler dazu, die Richtung der Reaktionspfeile in den vorgegebenen Reaktionsgleichungen zu berücksichtigen.

Beispiel 4:

[S2:] Die Zinkkathode ist ja jetzt negativ aufgeladen, also setzen sich positive Zinkteilchen aus der Zinksulfatlösung an die Zinkkathode heran. Dann ist dieses Sulfat negativ aufgeladen. Dann wandern [...] aus der Kupfersulfatlösung positive Teilchen [...] zur Zinksulfatlösung hinüber. Dann ist dieser [Kupfersulfatlösung] negativ aufgeladen, diese Kupferkathode ist noch neutral. Dann wandern [...] Kupferteilchen aus der Kupferkathode in [...] die Kupfersulfatlösung hinaus. Weil, dann wäre diese Kupfersulfatlösung wieder neutral. Dann ist jedoch die Kathode [...] negativ aufgeladen. Weil ja positive Teilchen sie verlassen haben. Diese [...] negativen Teilchen laufen dann [...] halt zu diesem positiven Pol. [1:07 – Skizze 2]

Der Endpunkt der Abfolge aus Beispiel 3 ist erreicht, wenn die unterschiedlichen Ladungen aus den beiden Anschlüssen der Quellen aufeinandertreffen und sich gegenseitig neutralisieren. Im Beispiel 4 ist der Endpunkt erreicht, wenn die Ladung, die von dem einen Anschluß der Quelle abgegeben wurde, am anderen Anschluß der Quelle angekommen ist.

Auch S4 beschreibt eine zeitliche Sequenz, bei der eine Elektrode, die von der Lösung aus negativ geladen wird, ihre Ladung nur für eine bestimmte Zeit trägt und sie dann an den äußeren Stromkreis abgibt.

In Kapitel 5.7.2.1 wird sich zeigen, daß die Beschreibung einer solchen zeitlichen Abfolge zu einem Perspektivenwechsel beim Umgang mit den Begriffen positiv und negativ führt.

ii) Auf dem Weg zu einer globalen Beschreibung der Vorgänge in den Zellen

Auch S10 beschreibt Vorgänge in einer zeitlichen Abfolge.

[S10:] Das ist zum Beispiel auch so eine Vorstellung, die ich jetzt habe. Das jetzt hier praktisch das ganze – ausgehend von dieser Quelle – so eine Art Kreislauf ist. Das heißt jetzt also, daß hier was passiert [Zn-Elektrode] und daß jetzt daraus praktisch hier eine Folgereaktion eintreten muß. [...] Beziehungsweise hier an der anderen Elektrode. [Cu-Elektrode]. [...] Also, das von der .. Quelle ... eben [...] Elektronen zugefügt werden – hier an die Zink-elektrode. Und das jetzt deswegen praktisch in dieser Lösung sich die Verhältnisse ändern. Und als Folgerung dessen muß jetzt hier – in der Lösung – sich auch wieder irgendwas ändern.

[I:] Also in der Lösung auf der rechten Seite [Kupfersulfatlösung].

[S10:] Ja. Und dann muß wieder was an der Elektrode passieren.

[I:] Also an der Kupferelektrode.

[S10:] Und diese beiden Elektronen, [...] die jetzt hier entstehen – an der Kupferelektrode – warum auch immer –, die fließen jetzt wieder in den anderen Teil hier von der Quelle zurück. [rechter Anschluß der Spannungsquelle] [0:40 – Skizze 2]

Er erkennt jedoch, daß diese Beschreibung nicht dem entspricht, was wirklich passiert, weil die Vorgänge praktisch alle gleichzeitig ablaufen.

[S10:] Ich argumentiere hier immer so einem .. ja, weiß ich nicht, mit so einem Deswegen-Prinzip – praktisch. [Skizze 2]
[...]

[I:] Das mit dem Deswegen-Prinzip interessiert mich.

[S10:] [...] Das sind immer so – weiß ich nicht – so Argumentationsstrukturen, die man sich da aufbaut und die [...] laufen immer so ab, daß man [...] eine Sache hat, da anfängt und [...] dann weitergeht und Folgerungen daraus schließt. [...] Dann passiert deswegen das und das danach und deswegen dann wieder das. Und – weiß ich nicht – das ist eigentlich, wenn [...] ich mir da wirklich [...] Gedanken drüber mache, ist das ja eigentlich total falsch. Das so zu sehen. Das ist ja irgendwie was, was alles gleichzeitig abläuft und [...] ich denke mal nicht [...] immer nur diesen einen Faktor praktisch als Grund hat. [0:42]

Er stellt fest, daß auch im Unterricht nie anders argumentiert wird.

Am Ende des Interviews wird der Schüler vom Interviewer gebeten, Fragen zur Elektrochemie an einen Fachmann zu formulieren. Er sagt daraufhin, daß er gerne eine Argumentation von einem Fachmann hören würde, die Gründe für die Vorgänge enthält.

[S10:] Zum Beispiel hier, wenn man jetzt einfach [...] so ausgehend von der Prämisse, daß sich jetzt hier dieses feste Teil in Form von diesen beiden Elektroden

[I:] In der ersten Zeichnung.

[S10:] [...] und diesem Ding einfach da rein packe [in die Lösungen] und was dann praktisch start-mäßig so passiert und warum das passiert. [1:17]

Hier wird deutlich, daß der Schüler keinen stationären Vorgang vor Augen hat, sondern sich für einen Startvorgang interessiert.

5.3.2.2 *Elektronentransport durch den inneren Stromkreis*

Einige der Befragten sprechen von Elektronen, die durch den inneren Stromkreis von einer Elektrode zur anderen gelangen. Dafür haben sie unterschiedliche Gründe. Wie die Schüler sich den Elektronenfluß in den Lösungen vorstellen, wird in Kap. 5.4.2 beschrieben.

S1 und S4 gehen davon aus, daß der Elektronenaustausch zwischen den Teilreaktionen über die beiden Lösungen und das Diaphragma stattfindet (s. Kap.

5.2.1). Daraus ergibt sich zwangsläufig, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis gelangen müssen.

S3, S6, S7, S8, S9 und S10 gehen davon aus, daß die Elektronen zwischen den Teilgleichungen durch den äußeren Stromkreis ausgetauscht werden (s. Kap. 5.2.1). Sie diskutieren dennoch einen Elektronentransport durch den inneren Stromkreis.

i) Elektronentransport zum Schließen des Stromkreises

S3 und S10 gehen davon aus, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis von der einen Elektrode zur anderen gelangen müssen, um den Stromkreis zu schließen. Dies ergibt sich aus der Vorstellung, daß nur der Fluß von Elektronen einen elektrischen Strom darstellt.

[S10:] Der Stromfluß läuft von dieser Zinkelektrode durch das Kabel, durch die Lampe, die dann anfängt zu leuchten, in das Kupfer. Dann passiert hier die Reaktion, daß .. Kupfer aus dieser Lösung mit diesen Elektronen wieder zu elementarem Kupfer wird. Und dann muß theoretisch [...] hier der Kreis geschlossen werden, irgendwie.

[I:] **Hier ist jetzt**

[S10:] Das ist hier an dieser Membran – das soll ja eine Membran sein, denke ich. [Diaphragma]. .. Die durchlässig ist. Ansonsten würde das ja nicht funktionieren. [0:05 – Skizze 1]

S3 leitet aus den Annahmen, daß der Stromkreis geschlossen sein muß und das nur der Fluß von Elektronen einen elektrischen Strom darstellt, ab, daß einzelne Elektronen durch die gesamte Apparatur transportiert werden müssen. Hier muß also ein Elektron den gesamten Weg durch den Stromkreis zurücklegen.

[S3:] Und jetzt gehen im Prinzip [...] zwei Elektronen von diesem Kupfer null auf die Reise, gehen durch die Kupferelektrode, müssen jetzt sich durch die kleinen Leitungen quetschen, wahrscheinlich auch noch durch ein Voltmeter irgendwo, und müssen dann auf der anderen Seite irgendwo auf der Zinkelektrode wieder raus kommen [...]. Ja, das ist der Weg eines Elektrons. Dann müßte das natürlich auch noch weiter transferiert werden durch die Lösung, damit wir auf der anderen Seite wieder Elektronen zur Verfügung haben, die wir dann wieder auf die Reise schicken können. Das heißt, dieses arme kleine Elektron macht dann eine Rundreise durch den Bottich und durch die Leitung. [0:25 – Skizze 2]

Im Gegensatz zu S3 und S10 geht S4 davon aus, daß die Elektronen zwischen den Teilgleichungen durch den inneren Stromkreis und nicht durch den äußeren ausgetauscht werden. Dennoch stellt auch er sich einen geschlossenen

Stromkreis vor. Für ihn findet der Elektronenfluß durch den äußeren Stromkreis nur statt, um den Stromkreis zu schließen (s. Kap. 5.2.1).

S7 nimmt für die Galvanische Zelle keinen geschlossenen Stromkreis an. Bei der Elektrolysezelle ist die Situation jedoch anders, weil seiner Meinung nach die Stromquelle einen geschlossenen Stromkreis verlangt. Sie verlangt, daß dasselbe Elektron, welches am Minuspol der Quelle abgegeben wurde, am Pluspol der Quelle wieder ankommt. Es müssen also in diesem Fall – genau wie bei S3 – einzelne Elektronen durch die gesamte Apparatur transportiert werden.

[S7:] Ja, aus der Stromquelle kommen ja eben halt [...] aus dem Minuspol [...] die Elektronen. Hier zum Beispiel das eine Elektron und das muß ja dann eigentlich wieder am Pluspol der Stromquelle ankommen. [0:53 – Skizze 2]

ii) Geschlossener Stromkreis ohne eine echte Verbindung

Auch S6 geht davon aus, daß der Stromkreis geschlossen sein muß.

Er sieht jedoch keine Möglichkeit, wie Elektronen durch den inneren Stromkreis von der einen Elektrode zur anderen gelangen könnten (s. Seite 103 – Argumente gegen einen Elektronentransport durch den inneren Stromkreis).

Er schließt daraus, daß es im inneren Stromkreis keine Verbindung zwischen den beiden Halbzellen gibt, da in seinen Augen nur ein Elektronenfluß einen elektrischen Strom darstellt.

Er bringt diese Vorstellungen dadurch in Einklang, daß er davon ausgeht, daß es zum Schließen des Stromkreises ausreicht, wenn an den Elektroden Stoffe vorhanden sind, die – je nach Bedarf – Elektronen abgeben oder aufnehmen können. Dann ist eine tatsächliche Verbindung nicht notwendig.

[S6:] Hier ist keine Verbindung [innerer Stromkreis]. Aber die wird geschlossen, indem ja sozusagen in den einzelnen Stoffen ja selber Elektronen vorkommen. [1:03 – Skizze 2]

Diese Vorstellung trägt der Erhaltung von Materie Rechnung. Die Auswirkungen der Ladungstrennung werden jedoch nicht berücksichtigt.

Diese Beschreibung findet auch Anwendung auf die Quelle, die nach Meinung von S6 die Kabel in Skizze 2 unterbricht (s. Kap. 5.8.1).

iii) **Ladungsausgleich zwischen den Lösungen ist kein Stromfluß**

Die Vorstellung, daß nur der Fluß von Elektronen einen elektrischen Strom darstellt, hat interessante Konsequenzen für die Argumentationen von S7.

Auch S7 geht davon aus, daß durch den inneren Stromkreis keine Elektronen gelangen können (s. Seite 103 – Argumente gegen einen Elektronentransport durch den inneren Stromkreis).

Elektronen werden durch den äußeren Stromkreis ausgetauscht. Dadurch werden die Lösungen an den Elektroden aufgeladen. Es wird ein Ladungsausgleich zwischen den beiden Lösungen notwendig, der durch das Diaphragma stattfindet.

So werden beispielsweise an der Anode positive Ionen in die Lösung gegeben, durch die die Lösung positiv wird. Weil ungleiche Ladungen sich anziehen, könnten nach einer Weile, wenn kein Ladungsausgleich stattfände, von der Elektrode keine Elektronen an den Draht abgegeben werden. Die positive Lösung zöge die Elektronen zu stark an. Daher ist ein Ladungsausgleich zwischen den Lösungen notwendig. Dieser wird durch H^+ - und OH^- -Ionen, die durch das Diaphragma wandern, erreicht (s. Kap.5.4.4).

Der Ladungsausgleich ist demnach ein Fluß von Ionen und stellt somit keinen elektrischen Strom dar, der mit dem Fließen von Elektronen gleichgesetzt wird.

Bei der galvanischen Zelle ist der Stromkreis folglich nicht geschlossen. Im inneren Stromkreis muß nur ein Ladungsausgleich stattfinden, ein Stromfluß ist nicht erforderlich.

[S7:] Also [, das heißt], daß die Elektronen ..., wenn die beim [...] beim Pluspol oder bei der Kathode angelangt sind, nicht wieder zur Anode zurück kommen. [0:56 – Skizze 1]

[S7:] Ja, die Verbindung [im inneren Stromkreis] ist dann eben nur da zum Ladungsausgleich. Irgendwie, damit überhaupt noch Strom fließen kann. Weil, wenn der Ladungsausgleich nicht stattfinden würde, dann .. [...] [würde] [...] die linke Halbzelle [...] immer weiter [...] positiv geladen werden und so würden auch keine Elektronen mehr entstehen. Und dann würde kein Strom mehr fließen. [0:56 – Skizze 1]

Bei der Elektrolysezelle verlangt die Stromquelle jedoch, daß dasselbe Elektron, das an ihrem Minuspol abgegeben wird, zu ihrem Pluspol zurückkommt. Hier reicht der Ladungsausgleich im inneren Stromkreis allein nicht aus. Es muß zusätzlich noch ein Elektronentransport stattfinden. Bei der Elektrolysezelle muß der Stromkreis geschlossen sein.

[S7:] [Skizze 2] Ja, ich denk mal bei einer Stromquelle muß, [...] wenn die [Elektronen] [...] am Minuspol [...] losgehen [...], die müssen auf jeden Fall, denke ich mal, am Pluspol ankommen. So denke ich mir das. Und jetzt hier bei der ersten Skizze [Skizze 1] haben wir das Problem eigentlich nicht. [0:55 – Skizze 1 & 2]

[S7:] Der Stromkreis ist ja erst geschlossen, wenn die Elektronen von der Kathode zur Anode über die [Lösungen] / wenn die Verbindung geschaffen wird. [0:46 – Skizze 2]

Dem Schüler ist nach eigenen Angaben nicht klar, wie die Elektronen durch den inneren Stromkreis gelangen können (s. Seite 103 – Argumente gegen einen Elektronentransport durch den inneren Stromkreis). Ein Ladungsausgleich zwischen den beiden Lösungen findet aber unabhängig davon auf jeden Fall statt.

[S7:] [Ein] Ladungsausgleich muß ja auf jeden Fall stattfinden ... Ja, weil hier [Zn-Elektrode] die Zn^{2+} Ionen verbinden sich dann mit diesen Elektronen und gehen somit aus der Lösung. Und die Lösung wird dann immer weiter negativ geladen werden, weil wir dann nur noch die SO_4^- drin hätten und die müssen dann eben durch die H^+ Ionen [aus der anderen Halbzelle] ausgeglichen werden. Also, so findet dann auch der Ladungsausgleich statt. ... Ja, und die Elektronenwanderung, die verstehe ich ja nur von der Stromquelle bis zur Kathode. Und danach ja nicht mehr. [0:59 – Skizze 2]

Auch S8, der im selben Chemiekurs ist wie S7, beschreibt, daß ein Ladungsausgleich durch den inneren Stromkreis stattfinden muß, der durch H^+ - und OH^- -Ionen, die durch das Diaphragma wandern, bewerkstelligt wird. Er liefert jedoch keine so genauen Begründungen dafür wie S7.

iv) Argumente gegen einen Elektronentransport durch den inneren Stromkreis

Die Schüler S6, S7, S9 und S10 geben Gründe dafür an, daß durch den inneren Stromkreis keine Elektronen gelangen können.

S9 und S10 folgern daraus, daß nicht Elektronen, sondern Sulfationen durch das Diaphragma fließen (s. Kap. 5.4.4).

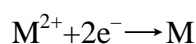
S6 geht von einem geschlossenen Stromkreis ohne echte Verbindung aus (s. Seite 100 – Geschlossener Stromkreis ohne eine echte Verbindung).

S7 trennt zwischen Ladungsausgleich und Stromfluß. Er stößt für die Elektrolysezelle auf Probleme, die er nach eigenen Angaben nicht lösen kann (s. Seite 100 – Ladungsausgleich zwischen den Lösungen ist kein Stromfluß).

Die von den Schülern vorgebrachten Argumente gegen einen Elektronentransport durch den inneren Stromkreis sind:

a) Die Reduktionsreaktion bindet Elektronen an die Elektrode

S6, S7, S9 und S10 stellen fest, daß an der Elektrode, die Elektronen an den inneren Stromkreis abgibt, folgende chemische Reaktion stattfindet:



Diese Reaktion bindet die Elektronen an die Elektrode (S6, S9, S10). Das entstandene M kann die Elektronen nicht zu der anderen Elektrode transportieren (S7). Daher besteht keine Möglichkeit, die Elektronen durch den inneren Stromkreis zu transportieren.

[S10:] An der Zinkelektrode entstehen erst mal zwei Elektronen. Aufgrund dieses Zerfalls hier. [...] Diese Elektronen [...] fließen durch dieses Kabel, durch die Lampe, [...] und werden dann hier, an der Kupferelektrode aber auf jeden Fall verbraucht, weil sie sich mit diesen Kupferionen zu elementarem Kupfer ... zusammen bilden. Und [...] dann sind diese Elektronen praktisch für mich weg. Also, dann [...] sind sie verbraucht, dann [...] ist es nicht mehr möglich, [...] genau die noch mal zu verwenden. [...] .. Ja .. also ..., weiß ich nicht, wenn hier Elektronen lang fließen sollten [Diaphragma], wo diese dann herkommen mögen. Das ist [...] mein Problem. Und das habe ich auch in der Elektrochemie nie verstanden. [0:25 – Skizze 1]

b) Das Diaphragma läßt nur bestimmte Ionen durch

S7 geht davon aus, daß das Diaphragma nur H^+ - und OH^- -Ionen durchläßt (s. Kap. 5.4.4). Diese Ionen tauchen in den vorgegebenen Reaktionsgleichungen nicht auf. Der Schüler sieht daher keine Möglichkeit, wie diese Ionen zum Transport der Elektronen zwischen den beiden Elektroden beitragen können.

Im Unterricht hat er einen Aufbau zur Elektrolyse kennengelernt, in dem es kein Diaphragma gab.

[S7:] [Bei einem Aufbau ohne Diaphragma] sind die Ionen dann eben rüber gewandert und hier können sie ja nicht durch das Diaphragma durch. Hier geht das ja nur mit diesen OH^- und H^+ , aber die setzten sich ja da nicht am Kupfer [ab]. [0:50 – Skizze 2]

Ein Aufbau ohne Diaphragma würde zwar dieses Problem, nicht aber das unter (a) beschriebene lösen.

c) Energieerhaltung

S10 argumentiert bei der galvanischen Zelle mit der Energieerhaltung.

Er überlegt sich, was mit dem Elektron passiert, wenn es durch den inneren Stromkreis gelangt ist. Es muß dann zum Schließen des Stromkreises wieder an die Elektrode abgegeben werden. Wenn sich das Elektron aber mit einem M^{2+} -Ion zu M verbindet, damit dieses – der vorgegebenen Reaktionsgleichung entsprechend – Elektronen an die Elektrode abgeben kann, so veränderte sich die Zelle nicht. Da sie eine Lampe betreibt, erzeugt die Zelle dann ohne Verlust Energie. Das kann nach Meinung des Schülers nicht sein.

[S10:] Wenn hier diese zwei Elektronen ankommen würden, durch die Membran, auf der linken Seite, daß dann wieder Zink $2+$ Ionen – mit diesen beiden Elektronen – zu elementarem Zink reagieren würden. Wobei die Vorstellung ja recht abstrus ist eigentlich, weil dann – wie gesagt – dann würde man hier Energie gewinnen, ohne praktisch irgendeinen Verlust dabei zu haben. Und das erscheint mir doch recht abwegig. Dann hätten wir ja die ganzen Probleme mit Atomkraft nicht [...]. [0:34 – Skizze 1]

Auch S3 überlegt sich, was mit den Elektronen passiert, wenn sie den inneren Stromkreis passiert haben. Er beschreibt einen ähnlichen Mechanismus wie S10, sieht aber das Problem mit der Energieerhaltung nicht. Er gibt keine Argumente gegen einen Elektronentransport durch den inneren Stromkreis an.

[S3:] Kupfer solid ist der Elektronenabgeber [...]. Also, es gibt die Elektronen ab. Dabei entsteht ein Kupfer 2+ Ion. Die Elektronen gehen dann durch den Draht auf die andere Seite zu der Elektrode. Dort ist der, der die Elektronen annimmt im Prinzip das Zink 2+. Es nimmt die Elektronen an, die von der anderen Seite kommen und gleicht sich damit im Prinzip aus. [...]
[Die Zinkhalbzelle hat zu viele Ladungen] und müßte sie dann wieder abgeben auf die andere Seite, damit wir dort wieder die ... müßte es [...] [Elektronen an] die Kupfer 2+ Ionen [...] [abgeben], damit wir dieses [Kupfer] null haben, damit dieses wieder zwei Elektronen abgeben kann, die den Kreislauf dann schließen. [0:32 – Skizze 2]

5.3.2.3 *Stromverbrauchsvorstellung und Quelle-Verbraucher-Modell*

In einigen Interviews spielt die aus der Physikdidaktik bekannte *Stromverbrauchsvorstellung* (s. Kap.2.3.2) eine Rolle bei der Beschreibung der elektrochemischen Zellen. Die *Stromverbrauchsvorstellung* findet sich dabei in unterschiedlichen Ausprägungen. Während die Beschreibungen von S1 ausgehend vom *Quelle-Verbraucher-Modell* (s. Kap.2.3.9.2) interpretiert werden können, macht es den Anschein, daß S4 und S10 dabei sind, sich von der Vorstellung eines *Stromverbrauches* zu lösen.

i) **Das *Quelle-Verbraucher-Modell* in der Elektrochemie**

S1 geht davon aus, daß der Austausch von Elektronen zwischen den beiden Teilreaktionen der galvanischen Zelle durch den inneren Stromkreis erfolgt. Bei der Elektrolysezelle beschreibt er keinen Elektronenaustausch zwischen den Elektroden (s. Kap. 5.2.1). Dies hängt damit zusammen, daß der Schüler klar zwischen innerem und äußerem Stromkreis trennt.

Die Vorgänge im inneren Stromkreis werden nahezu unabhängig von denen im äußeren beschrieben. Die einzige Verbindung ist die, daß die in der Galvanischen Zelle entstehende "Spannung" etwas in der Lampe, und die von der Stromquelle zugegebene "Spannung" etwas in der Elektrolysezelle auslöst. Wenn sich Elektronen im inneren Stromkreis bewegen, hat das eine andere Bedeutung als wenn sie sich im äußeren Stromkreis bewegen. In letzterem vermitteln sie nur die Wirkung, die das eine Bauteil des Stromkreises auf das andere hat. Hier wird physikalisch argumentiert. Im inneren Stromkreis werden die Vorgänge ausgehend von der Chemie beschrieben. Hier nehmen Teilchen je nach ihrer Tension (s. Kap. 5.2.2.1) Elektronen auf oder geben sie ab.

Die Beschreibung des äußeren Stromkreises entspricht dem *Quelle-Verbraucher-Modell*, bei dem die Quelle Strom (=Elektronen) an den Verbraucher

abgibt. Der Strom wird dort verbraucht (*Stromverbrauchsvorstellung*). Das spiegelt sich auch darin wider, wie S1 die Richtung des Elektronenflusses in den äußeren Stromkreis einzeichnet⁴¹ (Abbildung 7).

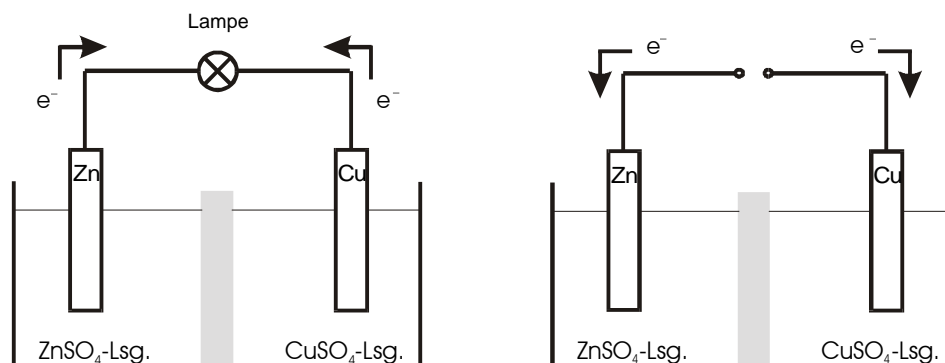


Abbildung 7: Elektronenfluß im äußeren Stromkreis nach dem *Quelle-Verbraucher-Modell* (S1)

Galvanische Zelle:

Hier ist die Zelle die *Quelle* und die Lampe ist der *Verbraucher*.

Die Reaktionen, die in der Zelle stattfinden, lösen etwas in der Lampe aus.

Die Elektronen fließen von beiden Elektroden der Zelle in die Lampe und "betätigen" diese. Danach sind sie verbraucht.

Die Lampe wird dabei als "Meßgerät" aufgefaßt, welches "Spannung" mißt, indem es sie in Licht verwandelt. Die Begriffsnamen 'Spannung' und 'Strom' werden nicht klar voneinander getrennt.

[S1:] Man könnte vielleicht sagen, daß hier die Elektronen in diese Richtung fließen [von beiden Elektroden zur Lampe] und die Lampe betätigen. Wenn sie hier gemessen werden, dann bleiben sie eben hier [zwischen einer der Elektroden und der Lampe]. Aber wenn das hier ist [in der Lampe], dann müssen die hier rein fließen und die Lampe leuchtet auf. [01:02 – Skizze 1]

Elektrolysezelle:

Die Zelle ist der *Verbraucher* und die Stromquelle die *Quelle*.

Elektronen fließen von beiden Anschlüssen der Quelle in die Elektroden.

⁴¹ Der Schüler zeichnet von allein keinen Elektronenfluß in den äußeren Stromkreis ein. Dies (Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Diese "fremden Elektronen", die nichts mit der Lösung zu tun haben, beeinflussen die Reaktionen. Durch die große Menge an "fremden Elektronen" aus der Quelle werden die Tensionen umgekehrt.

- [S1:] Und ich könnte mir vorstellen, daß es, wenn sozusagen fremde Elektronen mit dazukommen, so aussieht wie in der zweiten Zeichnung.
- [I:] **Der Begriff 'fremde Elektronen' interessiert mich. Kannst du das noch weiter umschreiben?**
- [S1:] Das sind nicht die Elektronen, die aus der Lösung kommen. Hier oder vom Kupfer – von der Kupferelektrode oder Kupfersulfatlösung – sondern aus der Stromleitung, die ja nichts mit Kupfer oder Kupfersulfat gemeinsames zu tun haben. Das heißt, die eigenen Elektronen kommen ja aus diesen Verbindungen und die fremden eben aus einer Stromquelle.
- [I:] **Was ist [...] dann noch mal der Grund dafür, daß die Reaktion einmal in diese Richtung abläuft und einmal in die andere [zeigt auf die jeweiligen Reaktionsgleichungen]?**
- [S1:] Meiner Meinung nach kommen mehr Elektronen dazu, die Reaktionen beeinflussen. Das heißt, dann schlägt sich die Abscheidungstension in die Lösungstension über und umgekehrt. Wenn das nur [die] eigenen Elektronen wären, würden sich die Tensionen so kenntlich machen wie normal – wie bisher [in Skizze 1].
- [I:] **Du sprichst davon, daß hier Elektronen dazugegeben werden. Kannst du den Weg von den Elektronen einzeichnen?**
- [S1:] Die gehen zur Kupferelektrode bzw. zur Zinkelektrode [äußerer Stromkreis] [0:37 – Skizze 2]

ii) Die Weiterentwicklung der *Stromverbrauchsvorstellung*

S4 geht genau wie S1 davon aus, daß die Elektronen zwischen den Teilreaktionen durch den inneren Stromkreis ausgetauscht werden. Er zeichnet jedoch einen Elektronenfluß in den äußeren Stromkreis ein, um den Stromkreis zu schließen. S10 geht davon aus, daß die Elektronen durch den äußeren Stromkreis zwischen den Teilreaktionen ausgetauscht werden (s. Kap. 5.2.1). Beide Schüler beschreiben, daß Elektronen durch den äußeren Stromkreis von einer Elektrode zur anderen fließen.

S4 und S10 gehen davon aus, daß keine Elektronen verbraucht werden. Ihrer Meinung nach muß jedoch bei der galvanischen Zelle etwas an den Verbraucher abgegeben werden. Die Elektronen müssen Energie an die Lampe abgeben. Wie dies geschieht, ist ihnen nach eigenem Bekunden nicht klar.

S4 überlegt, ob die Elektronen in der Lampe "langsamer" oder "schwächer" werden. Eine weitere Möglichkeit, die er diskutiert, ist die, daß die Elektronen unterschiedliche "Ladungen" tragen, wobei Elektronen mit "großer Ladung" mehr abgeben als Elektronen mit "kleiner Ladung".

[S4:] [Es] kommt halt immer darauf an, wie schnell Elektronen fließen, also wie viele Ladungen [...] sie mit sich reißen können in diesem Draht, bringen sie halt diese Lampe zum leuchten und dadurch, die geben dann ihre Ladung ab und laufen eigentlich verlangsamt weiter erstmal.

[I:] **Und wohin weiter?**

[S4:] Eigentlich .. diese Galvanolyse, die läuft ja nicht ewig weiter, die werden einfach erst mal langsamer und – würde ich sagen mal so abstrakt beschrieben – schwächer und ich glaube .. die verlangsamen sich .. ich weiß jetzt nicht, wie ich das beschreiben würde. Auf jeden Fall .. die Elektronen kann man ja nicht verbrauchen, die sind ja nicht weg, aber auf jeden Fall sind sie [...] im Prinzip schwächer geworden. [...] Könnte ich jetzt wirklich auch nicht genau beschreiben. [0:56 – Skizze 1]

Später bittet der Interviewer S4, den Begriff 'Ladung' zu definieren:

[S4:] Ja, Ladungen. Das kommt immer darauf an. Ein Elektron kann unterschiedlich viele Ladungen, also es kann immer nur eine Ladung tragen, aber die kann eigentlich im Prinzip unterschiedlich stark sein. Wir haben mal gesagt, Elektronen haben eine spezielle oder für sich selbst gesehene Ladung. Die kann unterschiedlich groß sein. Und wenn die jetzt zum Beispiel viele Ladungen hat, oder nicht viele, also eine große Ladung hat, dann hat es die Möglichkeit zum Beispiel [...] wenn es die abgibt gibt es zum Beispiel ein bißchen mehr Energie ab als wenn die nur eine einfache Ladung hat. [1:12]

Als der Interviewer S10 bittet, im Zusammenhang mit 'Pluspol' und 'Minuspol' mit dem Begriff 'Ladung' zu argumentieren, spricht dieser von einer "Energie-ladung" der Elektronen, die an den Verbraucher abgegeben werden⁴².

[I:] **Macht es Sinn, da mit Ladungen zu argumentieren?**

[S10:] ... Mit Ladungen? ... Ne, glaube ich eigentlich nicht. ... Also, ich weiß es nicht. Ja, ja doch, doch, doch.

[I:] **Wie würde das dann aussehen?**

⁴² S10 geht davon aus, daß Elektronen vom Pluspol zum Minuspol fließen (s. Kap. 5.6.1).

[S10:] Das würde so aussehen, daß hier bei Plus die Elektronen [...] eben eine hohe Energieladung – sagen wir – noch haben. Die dann aber – weiß ich nicht – eben vielleicht verbraucht wird. Und dann eben beim Minus eine geringere Ladung haben eben, am Ende. .. Also ich meine das ist .. Das ist ja so, man kann ja Strom nicht mehrfach verwenden. Also [...] ich denke mal – der Strom, den ich in meinem Fön – oder was weiß ich – irgendwie verbrate, [...] den wird auf gar keinen Fall noch irgendwie noch jemand anders benutzen – um seinen Ofen an zu machen, oder so. .. Weil, ich meine, [...] dann würden wir ja auch mit dem auskommen, was wir da im Netz haben, ne. Dann bräuchte man keine Heizkraftwerke – oder so. [...] Wie gesagt – ich denke, daß [...] das vielleicht darauf ankommt – weiß ich nicht – wie energiereich die Elektronen sind – zu dem Zeitpunkt. [1:12 – Skizze 2]

5.3.3 Diskussion

In den Interviews wird deutlich, daß Vorstellungen aus der Elektrizitätslehre beim Erlernen der Elektrochemie eine große Rolle spielen. Insbesondere zeigen sich in den Gesprächen folgende aus der Physikdidaktik bekannte Probleme:

- Die Schüler ziehen den *Strombegriff* dem *Potentialbegriff* vor (s. Kap. 2.3.1).
- Werden elektrische Stromkreise mit Hilfe des Strombegriffes beschrieben, so steht das einer globalen Beschreibung des Systems entgegen. Entsprechend sind die Beschreibungen der Schüler *lokaler* Natur (s. Kap. 2.3.5), sie folgen dem Fluß des Stroms. Dies steht in engem Zusammenhang mit der *sequentiellen Argumentation* der Schüler (s. Kap. 2.3.6).
- Ein elektrischer Stromkreis muß geschlossen sein. Diese Vorstellung ist richtig, führt jedoch im Zusammenhang mit der Annahme, daß nur der Fluß von Elektronen einen elektrischen Strom darstellt, zu Problemen. Diese Vorstellung dürfte ihre Wurzeln im Physikunterricht haben, in dem normalerweise elektrische Stromkreise diskutiert werden, die nur aus Elektronenleitern bestehen (s. Kap. 2.3.1 – STOCKLMAYER & TREAGUST, 1996).

In physics course, current often is implied to be electronic in all parts of the circuit even if there is a battery.
(OGUDE & BRADLEY, 1994)

Die Existenz dieser Probleme bei der Beschreibung von elektrochemischen Zellen wurde auch in einigen der in Kap. 2.2 beschriebenen Untersuchungen gefunden.

Misconception 2g. The movement of ions in solutions does not constitute an electric current.

(GARNETT & TREAGUST, 1992a)

Einen Kompromiß scheint die Vorstellung darzustellen, daß nur der Fluß von negativen Ionen im Elektrolyten einen elektrischen Strom darstellen.

Misconception 10f (only negatively charged ions constitute a flow of current in the electrolyte and the salt bridge).

(SANGER & GREENBOWE, 1997a)

- Ein weiteres Problem stellt die *Stromverbrauchsvorstellung* dar (s. Kap. 2.3.2). So können einige Aussagen der Schüler ausgehend vom *Quelle-Verbraucher-Modell* interpretiert werden (s. Kap. 2.3.9.2).

Die Existenz der Stromverbrauchsvorstellung belegt auch MAROHN (1999).

Die Schülerkommentare wiesen auf folgende Falschvorstellungen hin:

[...]

- Nach "Durchfluß" des elektrischen Stroms durch eine elektrolytische Zelle zeigt das Amperemeter eine kleinere Stromstärke an, da sich der Strom der Zelle teilweise "verbraucht".

(MAROHN, 1999, Seite 138f)

Einige Schüler beschreiben die Vorgänge in den Zellen als zeitliche Abfolge (s. Kap. 5.3.2.1). Die Konsequenzen dieser Beschreibung werden später diskutiert (s. Kap. 5.7.3).

Anhand der Ausführungen von S10 werden einige Probleme besonders deutlich. So wird klar, daß der Schüler einen Startvorgang beschreibt (s. Seite 98). Dieses Problem scheint auch im Physikunterricht eine Rolle zu spielen. Der Lehrer beschreibt einen stationären Vorgang, also eine Situation, in der das betrachtete System schon so lange in Betrieb ist, daß die auftretenden Spannungen und Ströme nicht mehr eine Funktion der Zeit sind⁴³. Dies ist vernünftig, wenn man bedenkt, daß die Zeit, die vom Schließen des Stromkreises bis zum Erreichen des stationären Zustandes vergeht, bei den in der Schule diskutierten Fällen meist sehr kurz ist. Auch das vom Schüler Gesagte wird üb-

⁴³ Es geht hier um die Beschreibung von Gleichstromkreisen.

licherweise so bewertet, als spräche er von einem stationären Zustand. Das ist möglicherweise aber nicht immer der Fall. Als Beispiel soll hier eine Frage dienen, die ein Schüler, der *lokal* argumentiert, stellen könnte:

'Wie sollen die Elektronen, wenn sie aus der Spannungsquelle kommen, wissen, was sie im Stromkreis erwartet?'

Diese Einstellung führt beispielsweise zu der Vorstellung, daß eine Batterie unabhängig von dem angeschlossenen Stromkreis einen immer gleich starken Strom abgibt (s. Kap. 2.3.4). Dies kann so interpretiert werden, daß der Schüler bei seinen Überlegungen dem Strom im Stromkreis folgt und so zu falschen Aussagen kommt. Geht man jedoch davon aus, daß der Schüler einen Startvorgang vor Augen hat, so ist seine Aussage nicht unbedingt falsch. Es dauert tatsächlich eine Weile, bis sich nach dem Schließen des Stromkreises die Ladungen derart im Stromkreis verteilt haben, daß das aus der neuen Ladungskonfiguration resultierende elektrische Feld dem des stationären Zustandes entspricht. Die Beschreibungen des Schülers weichen in dem Moment von der naturwissenschaftlichen Sichtweise ab, in dem er entweder davon ausgeht, daß jedes Elektron selbst an einem Widerstand ankommen muß, um von diesem beeinflußt zu werden oder daß beim Startvorgang zumindest die ersten Elektronen bis zum Widerstand gelangt sein müssen, bis sich dessen Wirkung im gesamten Stromkreis entfaltet⁴⁴.

Es muß nicht so sein, daß die Schüler wirklich einen Startvorgang beschreiben. Wahrscheinlich wird von ihnen nicht richtig zwischen Startvorgang und stationärem Zustand unterschieden. Es könnte jedoch sein, daß es sich – zumindest in der Oberstufe – lohnt, den Startvorgang zu thematisieren. Dies kann der verständlichen Verwunderung der Schüler darüber, woher die Elektronen von Anfang an 'wissen', was sie im Stromkreis erwarten wird, entgegenwirken.

Stellungnahme 4: Unterscheidung zwischen Startvorgang und stationärem Zustand

⁴⁴ Beim Startvorgang müssen sich nur die Veränderungen des elektrischen Feldes ausbreiten. Der Fluß der Elektronen in einem Stromkreis ist relativ langsam. Die Größenordnung der Driftgeschwindigkeit der Elektronen ist etwa 1cm/min (BERGMANN & SCHAEFFER, 1971, Seit 486).

Aus dem Interview mit S10 geht noch etwas anderes sehr deutlich hervor. Aus Sicht des Lehrers erscheint es nicht sinnvoll, mit dem Potentialbegriff zu argumentieren, da dieser von den Schülern nicht verstanden wird. Daher werden die Vorgänge in elektrochemischen Zellen auch vom Lehrer ausgehend vom Strombegriff und damit als zeitliche Abfolge beschrieben. Das Interview zeigt jedoch auch einen möglichen Ausweg aus diesem Dilemma. Der Schüler durchschaut das Problem von selbst, indem er seine Vorgehensweise mit dem Begriff "Deswegen-Prinzip" umschreibt. Ihm ist klar, daß er die Vorgänge nur so beschreibt, als würden sie nacheinander stattfinden und daß eigentlich alles gleichzeitig passiert.

Man könnte versuchen, das Problem der Beschreibung als *zeitliche Abfolge* durch konsequente Benutzung des Feldbegriffes zu beseitigen. Es scheint aber auch denkbar, sie unter Verwendung des – leichter verständlichen Strombegriffes – zu überwinden, wenn man thematisiert, daß diese Beschreibung insofern falsch ist, als daß alle Vorgänge in den Zellen gleichzeitig stattfinden. Das Beispiel von S10 zeigt, daß Schüler durchaus in der Lage sein können, auf einer Metaebene über die benutzten Beschreibungen nachzudenken.

Stellungnahme 5: Zeitliche Abfolge und "Deswegen-Prinzip"

Einige der Befragten gehen davon aus, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis von einer Elektrode zur anderen gelangen. Diese Annahme wurde auch in anderen Untersuchungen gefunden.

20% der Schüler der Jahrgangsstufen 12 und 13 gaben an, daß sich Elektronen von der Zinkhalbzelle zur Kupferhalbzelle durch die poröse Trennwand bewegen.

[...]

Die Vorgabe einer Salzbrücke an Stelle der porösen Trennwand verstärkte die Vorstellung vom Elektronenfluß zwischen den beiden Halbzellen. Die Zahl der Schüler, die eine Elektronenwanderung durch die Lösung von der Zink- in die Kupferhalbzelle annahmen, stieg von 20% auf 38%.

(MAROHN, 1999, Seite 84)

Misconception 10a: Electrons enter the electrolyte at the cathode, move through the electrolyte, and emerge at the anode.

(GARNETT & TREAGUST, 1992b)

Die Vorstellungen zum Leitungsmechanismus im Elektrolyten werden in Kap. 5.4.2 beschrieben.

Die Schüler begründen den Elektronenfluß durch den inneren Stromkreis auf unterschiedliche Weise:

- Der Elektronenaustausch zwischen der Oxidations- und der Reduktionsreaktion findet durch den inneren Stromkreis statt (s. Kap. 5.2.4).
- Elektronen werden durch den äußeren Stromkreis zwischen der Oxidations- und der Reduktionsreaktion ausgetauscht. Der Stromkreis muß geschlossen sein. Da nur der Fluß von Elektronen einen elektrischen Strom darstellt, müssen Elektronen durch die Lösung wandern, um den Stromkreis zu schließen.

Das wird besonders bei S7 deutlich, der zwar einen Ladungsausgleich zwischen den Lösungen beschreibt, aber zusätzlich einen Elektronenfluß fordert. Der Ladungsausgleich wird durch Ionen erreicht und stellt für den Schüler somit keinen elektrischen Strom dar.

Einige Schüler finden von selbst Argumente, die gegen einen Elektronentransport durch den inneren Stromkreis sprechen (s. Kap. 5.3.2.2). Diese Argumente sind, daß Elektronen bei der Reduktionsreaktion an der Elektrode gebunden werden, daß das Diaphragma den Elektronentransport durch den inneren Stromkreis verhindert und daß sich die galvanische Zelle bei einem Elektronentransport durch die Lösungen nicht verändern würde, obwohl sie Energie an die Lampe abgibt.

Auch S6 stellt fest, daß Elektronen nicht durch die Lösung gelangen können. Da er von einem geschlossenem Stromkreis ausgeht, nimmt er an, daß keine echte Verbindung notwendig ist, um den Stromkreis zu schließen. Es reicht, wenn genügend Teilchen da sind, die, je nach Bedarf, Elektronen aufnehmen oder abgeben können. Dieser Schüler übersieht die Ladungstrennung und den daraus resultierenden Energieaufwand, der einem solchen Prozeß im Wege steht. Er beachtet lediglich die Tatsache, daß Elektronen, die in einer chemischen Reaktion aufgenommen werden, bei einer anderen Reaktion bereit gestellt werden müssen. Das entspricht der wissenschaftlich korrekten Vorstellung, daß Oxidation und Reduktion immer gemeinsam auftreten müssen. Führt

man eine Redoxreaktion ohne die räumliche Trennung durch, die elektrochemische Prozesse auszeichnet, so besteht in der Tat keine Notwendigkeit für einen anderen Ladungstransport als den Austausch von Elektronen zwischen dem Reduktionsmittel und dem Oxidationsmittel. In diesem Fall sind die Richtungen der Elektronenbewegungen räumlich gesehen völlig ungeordnet. Daher wird auch außer der Volumenarbeit durch Ausdehnung oder Kontraktion des Systems keine Arbeit geleistet. Werden die beiden Reaktionen räumlich voneinander getrennt, so kann die Elektronenübertragung Arbeit verrichten – der Elektronentransport ist räumlich geordnet. Das führt aber zu einer Ladungstrennung, die den Prozeß zum Erliegen bringt, wenn man nicht einen Ladungstransport in Gegenrichtung durch den Elektrolyten zuläßt. S6 beachtet also nur die Redoxreaktion und übersieht die Ladungstrennung. Seine Argumentation ist das genaue Gegenteil von dem, was S9 beschreibt. Bei seinem Laden-Entladen-Zyklus steht die Ladungstrennung im Vordergrund und die Reaktionsenthalpien werden übersehen (s. Kap. 5.1.4).

Folgende Voraussetzungen sind notwendig, um zu verstehen, daß Elektronen nicht durch den inneren Stromkreis fließen:

1. Der Elektronentransfer zwischen der Oxidations- und der Reduktionsreaktion findet durch den äußeren Stromkreis statt.
2. Nicht nur der Fluß von Elektronen, sondern jede bewegte Ladung stellt einen elektrischen Strom dar. Folglich genügt der Fluß von Ionen durch die Lösungen, um den Stromkreis zu schließen.
3. Freie Elektronen sind in den Lösungen nicht beständig. Sie bewirken beim Austritt aus einer Elektrode eine Reduktionsreaktion.
4. Der Stromfluß im inneren Stromkreis ist notwendig, um der Ladungstrennung durch die räumlich geordnete Elektronenübertragung über den äußeren Stromkreis entgegenzuwirken.

Stellungnahme 6: Erfordernisse für das Verständnis der Tatsache, daß durch den inneren Stromkreis keine Elektronen fließen

Die Aufteilung von Wissen in voneinander unabhängige Fächer wird von GARNETT, GARNETT & TREAGUST (1990) als mögliche Ursache für Probleme

der Schüler angesehen. Das zeigt sich zum Beispiel daran, daß Schüler unter Strom in der Physik etwas anders verstehen als unter Strom in der Chemie.

Misconception 2c. Electricity in chemistry and physics is different because the current flows in opposite directions.

(GARNETT & TREAGUST, 1992a)

Das wird auch bei S1 deutlich, dessen Beschreibungen dem *Quelle-Verbraucher-Modell* entsprechen (s. Kap. 2.3.9.2 und Kap. 5.3.2.3). Hier wird deutlich zwischen innerem und äußerem Stromkreis unterschieden. Im inneren Stromkreis werden Elektronen zwischen chemischen Teilchen ausgetauscht. Im äußeren Stromkreis ist der Elektronenfluß – entsprechend dem *Quelle-Verbraucher-Modell* – gleichbedeutend mit dem Austausch von Energie zwischen Quelle und Verbraucher (s. Kap. 5.2.4).

Einige Schüler trennen ihre Vorstellungen in zwei aus ihrer Sicht voneinander unabhängige Gebiete – der Physik und der Chemie. Diese Trennung sollte aufgehoben werden. Es sollte klar gestellt werden, daß ein Elektronenfluß in der Physik nichts anderes ist als ein Elektronenfluß in der Chemie.

Stellungnahme 7: Ein Elektronenfluß ist in der Chemie das gleiche wie in der Physik

S4 und S10 haben eine weiterentwickelte Stromverbrauchsvorstellung. Sie wissen zwar, daß keine Elektronen verbraucht werden, ihrer Meinung nach müssen die Elektronen aber irgendwie Energie an die Lampe abgeben und sich somit verändern (s. Kap. 5.3.2.3). Es sind also die Elektronen, die Energie an die Lampe abgeben. Das ist aus wissenschaftlicher Sicht gesehen zwar nicht korrekt, aber eine solche Beschreibung wird von einigen Autoren als sinnvolle Übergangsvorstellung ("*conceptual bridge*" – VAN DEN BERG & GROSHEIDE, 1997) angesehen. So schlagen VAN DEN BERG & GROSHEIDE vor, im Unterricht für Schüler im Alter zwischen 13 und 15 Jahren ein Modell zu benutzen, daß sie als "*creatures model*" bezeichnen. Elektrischer Strom wird dabei mit kleinen Kreaturen verglichen, welche die Batterie mit einem Rucksack voller Energie verlassen. Sie geben die Energie im Verbraucher ab und kommen mit leeren Rucksäcken am anderen Ende der Batterie wieder an (Abbildung 8).

The concept electric current is introduced through the analogy of little 'creatures' (called 'current particles') who run through the wires with backpacks of energy. The particles get their energy in the voltage source and deposit it in the appliance and then return empty. The current particles are vehicles for energy transportation. The vehicles are conserved in the process while the energy is 'used' or transferred.

(VAN DEN BERG & GROSHEIDE, 1997)

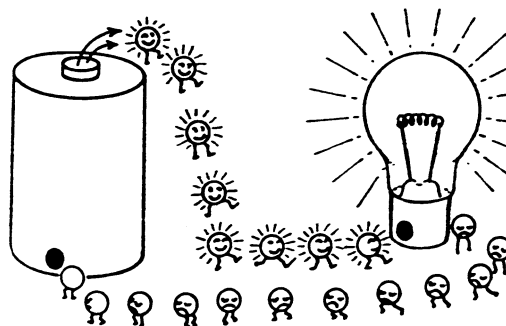


Abbildung 8: "Creatures with energy" (VAN DEN BERG & GROSHEIDE, 1997)

Die Autoren stellen fest, daß jede Analogie ihre Grenzen hat⁴⁵. Die negative Seite dieser Analogie ist, daß der falsche Eindruck entsteht, daß die Stromteilchen auf ihrem Weg zurück zur Batterie keine Energie transportierten. Dieses Problem sollte – nach Meinung der Autoren – später durch das Feldkonzept gelöst werden.

In this model the distinction between electric current and energy is not a problem any more. However, students do get the wrong idea that the current particles carry energy in the wire from the positive pole to the bulb, but do not carry energy on the way back to the negative pole of the battery. This problem could be solved later at senior level, when fields have been introduced.

(VAN DEN BERG & GROSHEIDE, 1997)

VON RHÖNECK (1988b) diskutiert eine Zeichnung, die Abbildung 8 ähnelt. Er kommentiert sie wie folgt:

⁴⁵ Zum Thema Analogien siehe auch THIELE & TREAGUST (1992; 1995)

Die in Abb. [...] dargestellte Visualisierung [...] wird in deutschen Schulbüchern vermieden, sie entspricht aber in etwa dem, was an Vorstellungen bei den Formulierungen "Arbeitsaufnahme in der Batterie" und "Arbeitsabgabe im Verbraucher" unausgesprochen suggeriert wird.

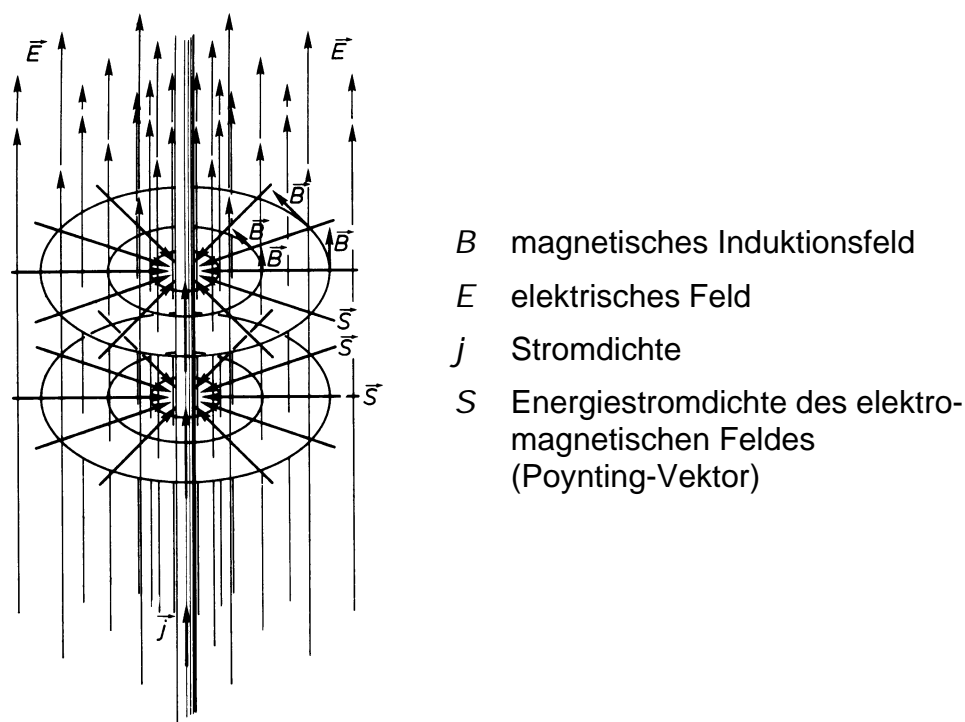
(VON RHÖNECK, 1988b)

Ausgehend von der wissenschaftlich korrekten Beschreibung geben nicht die Elektronen, sondern die gesamte Ladungskonstellation des Systems Energie an die Lampe ab. Man kann das veranschaulichen, indem man sich ein Elektron vorstellt, welches sich in der Nähe einer negativen Ladung Q befindet. Wenn sich dieses Elektron von Q entfernt, so nimmt seine potentielle Energie ab. Das heißt, es muß Energie umgewandelt werden. Das kann sich beispielsweise so äußern, daß das Elektron schneller wird. Dann wird die potentielle Energie in kinetische Energie überführt. Diese gerichtete Driftgeschwindigkeit des Elektrons wird, wenn es sich in einem dünnen Draht bewegt (z.B. in einer Lampe), durch Streuprozesse abgebremst⁴⁶. Dabei entstehen räumlich ungeordnete Bewegungen. In der Lampe wird im Endeffekt potentielle Energie in Wärme und zum Teil in Licht überführt. Ursprünglich war die Energie jedoch nicht im Elektron, sondern in der Konstellation Elektron – negative Ladung Q gespeichert. Bei der Energieumwandlung verändert sich folglich nicht das Elektron selbst, sondern lediglich seine Entfernung von der Ladung Q und damit die Ladungskonstellation des gesamten Systems. Die Funktion der Spannungsquelle in einem Stromkreis ist es, die ursprüngliche Ladungskonstellation und somit die Spannung aufrecht zu halten.

Dies verdeutlicht, wie komplex eine exakte Beschreibung über den Strombegriff ist. Das Feldkonzept macht die Beschreibung übersichtlicher, aber auch abstrakter. Das elektrische Feld repräsentiert dabei die Kraft, die ein Elektron erfährt, wenn man es in das System bringt. Es wird durch die Ladungskon-

⁴⁶ Dabei sind bei Zimmertemperatur nicht – wie oft angenommen wird – Stöße der Elektronen des Elektronengases untereinander, sondern Stöße zwischen Elektronen und Phononen (Gitterschwingungen) ausschlaggebend. Der Wert der mittleren freien Weglänge für Elektron-Elektron-Stöße ist bei Zimmertemperatur mindestens um den Faktor 10 größer als der für Elektron-Phonon-Stöße. Das zeigt sich auch in der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes (KITTEL, 1993, Seite 329f).

stellation des Systems erzeugt⁴⁷ und beschreibt für jeden Punkt im Raum den Betrag und die Richtung der Kraft, die auf eine Ladung an diesem Punkt wirken würde. Der Betrag der Kraft ist vom Betrag dieser Ladung und die Richtung der Kraft vom Vorzeichen der Ladung abhängig. Die Stärke des fließenden elektrischen Stroms hängt über das OHM'SCHE GESETZ mit der elektrischen Feldstärke zusammen. Ein elektrischer Strom erzeugt ein magnetisches Feld. Das elektrische und das magnetische Feld erzeugen zusammen einen Energiefluß in den Draht (Abbildung 9), der sich dadurch erwärmt.



- B magnetisches Induktionsfeld
- E elektrisches Feld
- j Stromdichte
- S Energiestromdichte des elektromagnetischen Feldes (Poynting-Vektor)

Abbildung 9: Energiefluß aus dem elektromagnetischen Feld in den Draht (BRANDT & DAHMEN, 1986, Seite 449)

Diese Ausführungen machen zweierlei deutlich: Auf der einen Seite ist eine exakte Beschreibung ausgehend vom Strombegriff sehr komplex, auf der anderen Seite ist eine Beschreibung über das Feldkonzept sehr abstrakt. Das Feldkonzept vereinfacht die Beschreibung nur, wenn man es wirklich verinnerlicht hat. Dabei ist die Betrachtung nicht wirklich weniger komplex. Es sind lediglich viele

⁴⁷ Das betrachtete Elektron wird hier ausgeklammert, da eine Ladung nicht mit sich selbst wechselwirkt.

Überlegungen in wenigen Größen zusammengefaßt, die einen mathematischen Umgang mit dem System und somit quantitative Vorhersagen vereinfachen. Das erklärt auch, warum Menschen, die viel mit Stromkreisen zu tun haben, das Feldkonzept vorziehen (s. Kap. 2.3.1). Sie kommen so leichter zu den quantitativen Ergebnissen, die sie in ihrem Alltag benötigen. Dabei macht das Feldkonzept keinerlei Aussagen über die Mechanismen, nach denen die Vorgänge ablaufen. Aus dieser Sicht bringt die Beschreibung über sich bewegende Teilchen mehr. Will man beispielsweise die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes aus Eigenschaften des Materials ableiten, so wird einem das Feldkonzept nicht weiterhelfen. Es zeigt sich einmal mehr, daß 'Experten' sich nicht auf ein Modell festlegen. Sie nutzen immer die Beschreibung, die ihnen für ihr aktuelles Problem am angemessensten erscheint.

STOCKLMAYER & TREAGUST (1996) fordern, daß man eine Beschreibung über elektrische Felder auch im Unterricht nutzen sollte.

Those who work with electricity, however, have evolved a field-like image and do not need the old model of current as 'electron flow'. Perhaps we as teachers should examine its usefulness for the next generation of students, weather they are proceeding to a career in electricity or not.

(STOCKLMAYER & TREAGUST, 1996)

Dem würde ich mich aus den oben beschriebenen Gründen nicht anschließen. Diejenigen, die – der Studie von STOCKLMAYER & TREAGUST (1996) zufolge – das Feldkonzept vorziehen, tun dies, weil sie schnell zu quantitativen Aussagen kommen müssen. Im Unterricht wird etwas anderes angestrebt. Dort wird versucht, den Schülern die Natur elektrischer Stromkreise verständlich zu machen. Dazu erscheint mir der Strombegriff gut geeignet. Damit ist nicht gemeint, daß das Feldkonzept nicht ein lohnendes Thema für den Physikunterricht ist. Ich halte es für die Beschreibung von elektrischen Stromkreisen in der Schule jedoch nicht für zwingend notwendig. Das Problem, daß der Strombegriff eine *lokale* Sichtweise nahelegt, kann im Unterricht thematisiert werden. Will man die globale Natur der Stromkreise hervorheben und verdeutlichen, daß die Elektronen sich beim Durchgang durch den Verbraucher nicht verändern müssen, so kann unter Umständen die Fahrradkettenanalogie ausreichen. Nicht das

einzelne Kettenglied treibt das Hinterrad des Fahrrads an und es verändert sich auch nicht während es das hintere Zahnrad passiert.

Für den Chemieunterricht dürfte die Entscheidung zwischen Feld- und Strombegriff einfach sein. Man kann nicht davon ausgehen, daß die Schüler das Feldkonzept verstanden haben. Es kann daher beim Unterrichten von Elektrochemie nicht als bekannt vorausgesetzt werden. Die Einführung des Feldbegriffes im Chemieunterricht erscheint nicht sinnvoll zu sein. Daher bleibt für die Beschreibung von elektrochemischen Zellen im Chemieunterricht nur der Strombegriff. Das Problem, daß der Strombegriff der globalen Natur des Systems nicht gerecht wird, kann im Unterricht thematisiert werden. Das Beispiel von S10, der das "Deswegen-Prinzip" formuliert, könnte dabei einen möglichen Weg darstellen. Analogien wie die Fahrradkettenanalogie können helfen, die globale Natur eines elektrischen Stromkreises zu verdeutlichen.

Stellungnahme 8: Beschreibung der Schulelektrochemie ist mit dem Strombegriff möglich

5.4 Vorgänge in den Lösungen

Nach der Theorie der elektrolytischen Dissoziation geht man davon aus, daß Salze in wäßriger Lösung dissoziieren. In den Lösungen liegen positive und negative Ionen vor. Aus Schülersicht ist es hingegen auch denkbar, daß in den Lösungen zunächst keine Ionen vorliegen. Diese entstehen demnach erst bei den Elektrodenreaktionen (Kap. 5.4.1).

Einige Schüler gehen fälschlicherweise davon aus, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis von einer Elektrode zur anderen gelangen müssen (s. Kap. 5.3.2.2). Sie beschreiben unterschiedliche Mechanismen für diesen Vorgang (Kap. 5.4.2).

Die Richtung des Ladungstransportes in galvanischen Zellen bereitet einigen Schülern Schwierigkeiten (Kap. 5.4.3).

Diese Themen werden in Kapitel 5.4.4 diskutiert.

5.4.1 Ionen in der Lösung

S1, S7, S8, S9 und S10 gehen davon aus, daß in den Lösungen M^{2+} und SO_4^{2-} -Ionen vorliegen. S7, S8 und S10 geben zusätzlich an, daß sich H^+ - und OH^- -Ionen in den Lösungen befinden⁴⁸.

S4 sagt hingegen, daß sich in einer neutralen Salzlösung keine Ladungen und somit auch keine Ionen befinden.

Der Interviewer fragt den Schüler, wie er sich eine Zinksulfatlösung vorstellt, die sich ohne Elektroden in einem Becherglas befindet. S4 beschreibt, daß sich Salz und Zink (als Metall) in der Lösung befindet. Beide werden von der wäßrigen Lösung zusammengehalten.

[I:] Also, wenn ich jetzt einfach eine Zinksulfatlösung hätte. Ohne eine Elektrode. Einfach in einem Becherglas. Wie würde die aussehen?

[S4:] Soll ich jetzt Struktursymbol, oder ?

[I:] Ja, oder wie stellst du dir das vor, eben mikroskopisch, wie die aussehen?

[S4:] Also, das ist eigentlich ein Zink, also Metall und ein Salz. Dies Sulfat ist ja ein Salz. Und die sind halt zusammen in einer wäßrigen Lösung.

[I:] Und sind da dann Ionen im Spiel?

[S4:] ... Also, ähm, sie ist ja eigentlich nicht geladen. Sie ist ja eigentlich neutral, diese Lösung. Und da dürfen erst mal keine Ionen oder keine Ladungen im Spiel sein. [1:05]

Aus den vorgegebenen Reaktionsgleichungen entnimmt S4, daß sich bei den elektrochemischen Zellen Cu^{2+} - bzw. Zn^{2+} -Ionen in den Lösungen befinden. Das wirft die Frage auf, warum – ausgehend von den Reaktionsgleichungen – keine Anionen (negative Ionen) in den Lösungen sind. Der Schüler folgert daraus, daß durch die Elektronen, die an der einen Elektrode in die Lösung gehen, Anionen (" A^{2-} ") entstehen. Ausgehend von dieser Folgerung leitet S4 einen Leitungsmechanismus für Elektrolyte ab (s. Kap. 5.4.2).

[S4:] [...] diese Elektronen sind in Lösung gegangen. Es ist also [...] ein Anion entstanden, also ein negatives Teilchen. [0:36 – Skizze 2]

⁴⁸ Dies ist für S7 und S8 wichtig, weil sie davon ausgehen, daß das Diaphragma nur für diese Ionen durchlässig ist. Für S10 handelt es sich lediglich um eine Randbemerkung. Da im Interview nicht nach diesen Ionen gefragt wurde, sagt es nichts aus, daß die anderen Schüler sie nicht erwähnen.

S4 ist der Ansicht, daß die Kationen, die sich in der Lösung befinden, dadurch entstehen, daß sich Ionen aus dem Metall der Elektrode oder aus der Lösung lösen. Dabei können sich die Ionen wahrscheinlich leichter aus der Lösung als aus dem Metall lösen.

[I:] [...] Wenn ich jetzt diese Zinksulfatlösung hier betrachte, in der Elektrolysezelle, ... Da sagtest du ja, da sind ja Ionen irgendwie im Spiel. ... Du hattest auch schon – ich würde das gerne noch mal zusammentragen – mehrere Ideen, wo diese Ionen herkommen können. Kannst du die noch mal gegeneinander abwägen?

[S4:] Also halt aus diesem festen Zink oder [...] aus der Zinksulfatlösung können sie eigentlich nur stammen. Aber ich vermute doch eher, daß die aus dieser Lösung stammen. Anstatt aus dem festen Zink. Das ist vielleicht eher möglich, daß sich die Bindungen innerhalb dieser Zinksulfatlösung auflösen und das daraus halt dieses Kation entsteht, als aus so einem festen Zinkmetallgebilde. [1:06 – Skizze 2]

S6 geht davon aus, daß Energie notwendig ist, um Bindungen zu lösen. Er fragt sich, ob die M^{2+} -Ionen frei in der Lösung vorkommen oder ob sie an SO_4^{2-} -Ionen gebunden sind. Wenn die M^{2+} -Ionen frei vorlägen, müßten sie zu MSO_4 reagieren. Für die Elektrodenreaktionen wäre es jedoch einfacher, wenn die M^{2+} -Ionen frei vorkämen, weil sonst unter Energieaufwand zunächst die Ionen erzeugt werden müßten, bevor eine den vorgegebenen Reaktionsgleichungen entsprechende Reaktion stattfinden könnte.

[S6:] [Da ist ein] kleiner Widerspruch bei mir jetzt drin, [...] ich hatte ja vorhin gesagt, daß Zinkionen liegen so in [...] wäßrigen Lösung vor. Dann würde das bedeuten, daß einmal Zinksulfat da ist und einmal Zinkionen.

[I:] Kannst du den Widerspruch noch mal genau beschreiben?

[S6:] Ja, wenn Sulfat dort vorhanden ist, besteht halt die Möglichkeit, wenn es als Zink 2+ dort [...] vorhanden ist, in dieser Lösung, daß es mit Sulfat reagiert und dann Zinksulfat bildet. ... Dann [...] muß mehr Energie aufgewendet werden, [um] erst diese Bindung wieder zu brechen und dann nimmt Zink 2+ – was ja dann gebildet wird dadurch – erst wieder die Möglichkeit geben Zink zu werden. Also, es wäre theoretisch einfacher, wenn das – also für das Zink – wenn es nur so vorkommen würde als 2+ [Ion], ohne in einer Bindung vorzukommen. [0:35 – Skizze 2]

Die Elektrolyte dienen als Lieferant bzw. als Abnehmer für M^{2+} -Ionen, die nicht einfach in Luft existieren können (S6).

5.4.2 Leitungsmechanismus in der Lösung

Der Beschreibung eines Elektronenflusses durch die Lösungen geht die Annahme voraus, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis von einer Elektrode zur anderen gelangen müssen (s. Kap. 5.3.2.2). Gründe für diese An-

nahme können sein, daß der Elektronenaustausch zwischen den Teilreaktionen durch den inneren Stromkreis stattfindet (S4⁴⁹), daß Elektronen durch den inneren Stromkreis fließen müssen, um den Stromkreis zu schließen (S3) oder daß die Quelle der Elektrolysezelle dieselben Elektronen, die sie am Minuspol abgibt, am Pluspol zurück bekommen muß (S7).

S6 beschreibt einen Elektronenfluß durch den Elektrolyten, kommt aber später zu dem Schluß, daß durch den inneren Stromkreis keine Elektronen gelangen.

Bei S9 spielt der Leitungsmechanismus im Elektrolyten nur für einen Aufbau mit durchlässiger Trennwand eine Rolle (s. Kap. 5.1.3.2).

5.4.2.1 *Teilchen als Elektronentransporter*

S3, S4 und S7 beschreiben einen Vorgang, bei dem Teilchen an der einen Elektrode Elektronen aufnehmen und diese durch die Lösungen zur anderen Elektrode transportieren, an die die Elektronen wieder abgegeben werden.

[S3:] [Dann] müßten wir wieder einen Träger haben, der im Prinzip dieses Elektron [durch die Lösungen] auf die andere Seite bringt und es dort wieder zur Verfügung stellt, damit der Stromkreislauf geschlossen wird. [0:29 – Skizze 2]

S3 beschreibt sofort einen Mechanismus, bei dem Ionen Elektronen aufnehmen und durch die Lösung transportieren.

[S3:] Dort ist der, der die Elektronen annimmt, im Prinzip das Zink 2+. Es nimmt die Elektronen an, die von der anderen Seite kommen und gleicht sich damit im Prinzip aus.
Das heißt [...], wenn man sich das mal bildlich vorstellen dürfte, wäre das im Prinzip ein LKW, der nicht voll beladen ist und zwei Paletten – sagen wir mal zu wenig [lacht] – [...] hat. Dem müssen wir zwei Paletten geben – oder zwei Anhänger.
Das war damals die erste Erklärung, die uns *** [der Lehrer] dafür gegeben hat.
So, und dann hat ja im Prinzip [...] dieser LKW oder [...] dieser Trog hat ja dann im Prinzip die volle Ladung und müßte sie dann wieder abgeben auf die andere Seite, damit wir dort wieder die ... müßte es doch nicht Kupfer 2+ Ionen [angehen —schwer verständlich], damit wir dieses [Kupfer] null haben, damit dieses wieder zwei Elektronen abgeben kann, die den Kreislauf dann schließen.

⁴⁹ Hier werden nur Schüler aufgeführt, die eine explizite Beschreibung eines Leitungsmechanismus im Elektrolyten geben.

[I:] Wo würde das dann passieren?

[S3:] Das könnte ja dann im Prinzip nur am Diaphragma passieren. .. Aber wie?...
... [...] so plausibel, wie man das erklären kann, gibt es da nichts für. [...] An
der Stelle hapert es und das ist sehr schwer zu erklären. [0:32 – Skizze 2]

Das Diaphragma bereitet dem Schüler bei dieser Beschreibung Probleme⁵⁰, da die Elektronentransporter – nach seiner Auffassung – nicht durch es hindurch gelangen können. Er löst diese Probleme dadurch, daß die Elektronentransporter die Elektronen zwischen den Elektroden und dem Diaphragma transportieren. Am Diaphragma tauschen zwei Transporter Elektronen durch das Diaphragma aus.

[S3:] Ich schätze mal, daß sich an beiden Seiten die Ionen anlagern, an diesem Diaphragma. Daß heißt, auf der einen Seite die Kupferionen, auf der anderen Seite die Zinkionen. Und das sich im Prinzip durch die Nähe, die [...] sie durch dieses Diaphragma haben – sich aber nicht vermischen können ... der Ladungsausgleich einfach so passiert. [...] Das die Ladung im Prinzip durch das Diaphragma geht. Das heißt, wenn wir auf der einen Seite die Zink 2+ Ionen haben [...] die müßten also an die 2+ Kupferionen .. ihre Ladung abgeben. .. Müßten ja diesen Stromkreis weiterführen. [0:13 – Skizze 1]

S4 scheint die Vorstellung von Teilchen als Elektronentransporter erst im Laufe des Gespräches zu entwickeln. Zunächst stellt er lediglich fest, daß Elektronen an der Anode in die Lösung gehen und zur Kathode transportiert werden.

Er sagt, daß er nicht genauer beschreiben kann, wie die Elektronen durch die Lösung gelangen. Er stellt sich vor, daß in der Lösung leitende Verbindungen sind, die die Elektronen transportieren.

Nachdem der Interviewer den Schüler um eine genauere Beschreibung des Ladungstransportes gebeten hat, sagt dieser, daß der Ladungstransport mit Hilfe von Metallen stattfindet, die in der Lösung vorhanden sind.

⁵⁰ Da Elektrolysen im Unterricht meistens ohne Diaphragma durchgeführt werden, hatte er diese Probleme im Unterricht nicht. Dort wurde bei der Behandlung der Elektrochemie mit Elektrolysezellen angefangen.

[S4:] Wenn die [Ladungen] jetzt einfach nur auf dieser einen Seite in dieser Lösung stecken bleiben würde, dann wäre überhaupt kein geschlossener Stromkreislauf vorhanden. Das heißt, die müssen weiter transportiert werden. Das wird halt mittels dieser Lösung gemacht. Durch diese Metalle innerhalb dieser Lösung. Normales Wasser ohne irgendwelche Metalle – wenn man hier [...] destilliertes Wasser hat – hat ja einen schlechteren Ladungstransport als wenn man zum Beispiel jetzt Metalle also zum Beispiel in diesem Wasser hat, zum Beispiel stark Eisen gelöst hat. [0:26 – Skizze 2]

Später stellt der Schüler fest, daß in den vorgegebenen Reaktionsgleichungen keine Anionen (negative Ionen) vorkommen (s. Kap. 5.4.1). Darauf hin sagt er, daß an der Elektrode, an der Elektronen abgegeben werden, Anionen ("A²⁻") entstehen, die durch die Lösung und durch das Diaphragma zur anderen Elektrode transportiert werden. Dort lagern sich die Anionen an und geben ihre Ladung – die zwei Elektronen – an die Elektrode ab.

[S4:] [Den] e⁻ Verlauf, habe ich ja beschrieben .. und jetzt würde ich mal sagen, daß hier zum Beispiel, statt dieser Elektronen, die nur wandern, hier dieses Anion [wandert] – also das ist auf jeden Fall [...] [das] Anion, was sich hier [Zinkelektrode] anlagert, dieses negative Teilchen und nicht [...] diese e⁻. Im Prinzip wird [...] durch die Anlagerung [...] dieses ganze im Prinzip negativ geladen. ... [...] ich würde sagen, aus diesen Anionen werden einfach nur jetzt diese Elektronen, also die [...] Ladung wird wieder abgegeben. Und es entsteht einfach ein neutrales Teilchen im Endeffekt. [0:38 – Skizze 2]

S7 unterscheidet zwischen dem Ladungstransport und dem Stromfluß im inneren Stromkreis. Letzteren setzt er mit einem Elektronenfluß gleich. Wie die Elektronen durch die Lösung gelangen, ist ihm nach eigenem Bekunden nicht klar. Eine der vom Schüler diskutierten Möglichkeiten, Elektronen durch die Lösungen zu transportieren, ist die, daß Zinkionen sie an der einen Elektrode aufnehmen und an der anderen wieder abgeben. Diese Vorstellung wird von ihm sofort wieder verworfen (s. Kap. 5.3.2.2). Dabei überlegt der Schüler, ob andere Ionen die Elektronen transportieren könnten.

[S7:] Wenn die Elektronen [im äußeren Stromkreis] zur Kathode wandern, werden sie aufgenommen – von den Zn²⁺ und werden dann zu Zink. Ja, und da ist ja im Grunde genommen Schluß. Höchstens mit diesen anderen SO₄⁻ oder hier [...] mit den Ionen des Wassers irgendwie. ... Ja, eine Verbindung [muß] da irgendwie stattfinden. Aber nicht mehr durch [...] das Zink. [0:58 – Skizze 2]

5.4.2.2 *Eigenschaften des Wassers*

i) **Ionen schaffen Freiräume für Elektronen**

S9 sagt, daß Ionen das Wasser leitfähig machen. Je höher die Ionenkonzentration ist, um so besser leitet die Lösung.

Die Wasserteilchen sind durch Wasserstoffbrücken fest miteinander verbunden. Ionen zerstören die Wasserstoffbrückenbindungen, indem sie sich zwischen die Wasserteilchen setzen. Dadurch entstehen Zwischenräume, durch die Elektronen hindurch gelangen können.

[S9:] Im Wasser hat man ja nur H_2O und das ist durch die Wasserstoffbrückenbin[dungen] ja ziemlich fest gebunden. Da [...] [können] die Elektronen also ganz schlecht [...] durchkommen [...]. Und wenn man jetzt Ionen in der Lösung hat [...], machen [die] diese Wasserstoffbrückenbindungsform wieder ein bißchen kaputt. Dadurch, daß sie [...] sich dazwischen setzten und dann können die Elektronen praktisch [...] da durch. Weil, es sind ja praktisch Zwischenräume da, wo diese gelösten Ionen drin sind. [0:19 – Skizze 2a]

ii) **Wasserstoffbrückenbindungen werden weitergereicht**

S6 beschreibt einen Leitungsmechanismus, der an den GROTHUS'SCHEN Mechanismus⁵¹ erinnert.

[S6:] Das [Wasser] ist ein Dipol. Und wir hatten das mit einem Hydroniumion beschrieben. [...] Das [ist] [...] ein H_3O^+ Teilchen. Das dann [...] die Elektronen irgendwie weiter gibt, durch eine Brücke. Das hatten wir mal kurz angesprochen. ... Das eine Wasserstoffbindung immer weitergegeben wird durch diese Kette. Also ich kann das mal versuchen aufzuzeichnen. [...] .. [Skizze 1 / unterer Teil des Blattes] .. Also das sollen jetzt mal Wassermoleküle sein. Diese H habe ich jetzt mal weggelassen. Das [so] zu sagen, dann bei einem H_3O^+ Teilchen, wo ja noch ein zusätzliches Wasserstoffatom vorhanden ist – im Gegensatz zum Wasser, einfach weitergegeben wird [...] von Molekül zu Molekül. [0:14 – Skizze 1]

5.4.2.3 *Elektronen werden von einem Ion zum nächsten gereicht*

S9 beschreibt neben dem in Kap. 5.4.2.2 beschriebenen Leitungsmechanismus noch einen weiteren.

Voraussetzung dafür ist, daß der Schüler von dynamischen chemischen Gleichgewichten ausgeht (s. Kap. 5.2.2).

⁵¹ In einer langen Kette von durch Wasserstoffbrücken assoziierten Wassermolekülen werden Bindungen umgelagert. Das erklärt die hohe *molare Leitfähigkeit* von Protonen in Wasser.

Ein von einer Elektrode abgegebenes Elektron wird zunächst von einem M^{2+} -Ion aufgenommen, löst sich danach aber wieder von diesem und geht zum nächsten Ion. Dieses Ion nimmt das Elektron auch nur für kurze Zeit auf und gibt es danach an das nächste Ion weiter. So gelangt das Elektron durch die Lösungen von einer Elektrode zur anderen. Es verläßt die Lösung an der Elektrode, an der ein Elektronenmangel herrscht, der einen Sog darstellt, der die Richtung des Elektronentransportes bestimmt.

[S9:] Ja, das kommt also in diese Lösung rein und trifft meinerwegen auf Kupfer $2+$ Ionen. Und dann reagiert es kurzzeitig damit, löst sich hinterher wieder ab, geht zu den nächsten [...]. Das also immer diese Reaktionen [...] haben wir ja meistens so eine [...] Dissoziation und so was, das ist ja immer in einem Gleichgewicht und das geht dann in Sekundenbruchteilen, daß sich zwi-schendurch Kupfer bildet und dann wieder auflöst, daß ist also praktisch nicht zu merken.

[I:] **Das heißt, es bildet sich Kupfer und dann gibt das Kupfer das Elektron wieder ab. Und was passiert danach mit dem Elektron?**

[S9:] Ja, das geht zum nächsten [...] Ion. Und da passiert das gleiche, bis das dann / aber wenn ein Elektron in irgendwo in eine Lösung rein geleitet wird, dann muß es ja auch irgendwo wieder raus gezogen werden. Und zu [...] diesem [...] Sog geht es ja praktisch hin. Das heißt, an einer Stelle wird es rein gegeben und dadurch, daß auf der anderen Seite es gebraucht wird, ist ein Sog da und dadurch [...] geht das praktisch [...] in die Richtung. [0:20 – Skizze 2a]

5.4.3 Richtung des Ladungstransportes in den Lösungen

S1 und S4 haben im Verlauf des Interviews das Problem, daß sich bei der galvanischen Zelle in der Lösung geladene Teilchen auf eine Elektrode mit der gleichen Ladung zubewegen.

S1 stellt bei der galvanischen Zelle fest, daß sich Cu^{2+} -Ionen zur Kupferelektrode wandern, dort Elektronen aufnehmen und zu Kupfer werden. Wenn sich positive Ionen auf die Kupferelektrode zubewegen, müßte sie eigentlich negativ sein. Der Schüler hat sie aber – ausgehend von auswendig gelerntem Wissen – mit Pluspol beschriftet. Er verläßt sich auf sein Wissen und behält die Beschriftung bei.

[S1:] Kupfer $2+$ aus der Kupfersulfatlösung [...] geht zum Kupferstab. [...] Dann muß das der Minuspol sein [erstaunt] ... na ja auf jeden Fall [...]

[I:] **Du hast gerade kurz inne gehalten und dann gesagt, daß das dann eigentlich der Minuspol sein müßte. [...] Warum hast du da gestutzt?**

[S1:] Weil. Es ist ja allen bekannt, daß entgegengesetzt geladene Teilchen sich anziehen, also muß der Pluspol die negativen anziehen und Minuspol die positiven. Dann muß es logischerweise der Minuspol sein, wenn Kupfer vom Kupferstab angezogen wird. Und umgekehrt, wenn Zink hier ... ich weiß es nicht mehr, wie es war. Nur rein logisch müßte es hier der Minuspol sein [Cu-Elektrode].

[I:] **Du kannst die Beschriftung noch verändern.**

[S1:] Ich laß es erst mal so. [0:09 – Skizze 1]

S4 beschreibt, daß negative Anionen Elektronen zum Minuspol transportieren. Aber eigentlich können negative Teilchen nicht zum negativen Pol wandern.

Um dieses Problem zu lösen, geht S4 davon aus, daß sich um die negative Elektrode eine Schicht von positiven Kationen bildet, die von der Elektrode angezogen werden und ihrerseits die Elektronen anziehen. Die Elektronen verbinden sich dann in der Nähe der Elektrode mit den Kationen⁵².

[S4:] Wenn wir jetzt hier ein negatives Teilchen haben, wie soll das überhaupt von einem negativen Pol angezogen werden? Das ist hier schon wieder die Schwierigkeit [...] Eigentlich müßte das doch [so] sein, daß das Anion von dem positiven angezogen wird. [...] Wieso sollte [...] dieses Anion sich plötzlich da zum Minuspol hinziehen? Dann wäre hier nämlich genau die gleiche Schwierigkeit, wieso sollte das wandern?

[I:] **Kannst du das an der anderen Seite dann auch noch mal durchgehen, wo da die Schwierigkeit liegt?**

[S4:] Wenn ich jetzt hier sage, hier entsteht auch ein Anion, also ein negatives Teilchen, wieso sollte es hier plötzlich zum Minuspol wandern? Dann könnte das eigentlich schon gar nicht mehr stimmen. [0:37 – Skizze 2]

[S4:] Kationen sind hier in der Nähe [der] Zinkelektrode, [sie] sind ja positiv geladen [...]. Ich schreibe jetzt mal K für Kation [bei der Zinkelektrode "K" (eingekreist)]. Die werden jetzt wohl recht nah hier dran sein, das würde heißen, wenn jetzt von außen mehrere – also eine ganze Reihe von Kationen – angelagert wären, also positive Teilchen, würden die halt diese Elektronen anziehen. Diese negativ geladenen Teilchen [...] würden sich [mit] dem Metall zu Zink verbinden. Und dann würde sich hier noch eine Zinkschicht drum binden. [0:50 – Skizze 2]

5.4.4 Diskussion

S4 geht davon aus, daß sich in neutralen Salzlösungen keine Ionen befinden. Erst bei den Elektrodenreaktionen entstehen Ionen. S6 stellt sich vor, daß M^{2+} -

⁵² S4 geht davon aus, daß der Elektronenaustausch zwischen den Teilreaktionen durch den inneren Stromkreis stattfindet (s. Kap. 5.2.1)

Ionen, wenn sie frei in der Lösung vorkämen, mit Sulfationen zu MSO_4 reagieren müßten.

Solche Vorstellungen werden auch von BUTTS & SMITH (1987b), MAROHN (1999) und OGUDE & BRADLEY (1996) beschrieben.

There were some who believed that sodium ions and chloride ions were released only when the solid dissolved in water ("solid sodium chloride doesn't conduct because it is in separate molecules") and two who believed that an electric current was needed for the dissociation process to occur.

(BUTTS & SMITH, 1987b)

Im Rahmen dieser Aufgabe bezeichneten zwei Drittel der Schüler die Aussage "HCl wird durch die Elektrolyse in H^+ - und Cl^- -Ionen gespalten" als korrekt. Dieses Ergebnis bestätigte sich, wenn als Elektrolyt eine Salzlösung bzw. eine Salzschmelze vorgegeben wurde.

Als Begründung führten die Schüler die Kraft des elektrischen Stroms bzw. die elektrische Spannung an oder verwiesen auf die Anziehungskräfte der beiden Pole, die eine Spaltung des HCl-Moleküls bewirken.

(MAHRON, 1999, Seite 58)

[...] the common error was that during electrolysis, an electric current breaks the electrolyte into positive and negative ions. [...] one of the reasons often given in the pencil and paper test [...] was "... without current the ions will not be formed."

(OGUDE & BRADLEY, 1996)

Einige Schüler stellen sich vor, daß sich erst durch die Einwirkung des elektrischen Stroms Ionen in den Lösungen bilden. Diese Vorstellung hat eine Entsprechung in der Wissenschaftsgeschichte⁵³.

Stellungnahme 9: Schwierigkeiten mit der elektrolytischen Dissoziation

GROTTUS entwickelte 1805 eine Theorie, nach der die Wasserstoffteilchen des Wassers positiv und die Sauerstoffteilchen negativ geladen werden, wenn man eine Spannung anlegt (DUNSCH, 1985, Seite 34). Als FARADAY 1834 den Begriff 'Ion' prägte, verstand er darunter lediglich diejenigen Körper der zersetzt werdenden Substanz, die zu den Elektroden gehen (s. Kap. 5.6.4.2).

In den 50er Jahren des 19. Jahrhunderts stellte HITTORF fest, daß Ionen auch ohne die Einwirkung des elektrischen Stroms entstehen und daß die Bewegung von Ionen für den elektrischen Strom in den Lösungen verantwortlich ist. Die Theorie der elektrolytischen Dissoziation wurde allerdings erst etwa 30 Jahre später von ARREHNIUS entwickelt (BOTSCH, 1993) und war zunächst heftig umstritten.

Aber man war der festen Ansicht, daß die Verbindungen erst durch die angelegte elektrische Spannung in Ionen gespalten würde. Man konnte sich nicht vorstellen, daß das Natriumchlorid, das sich mit so großer Energieabgabe aus Natrium und Chlor bildet, durch Wasser würde gespalten werden können, ohne daß dabei ein merklicher Energieeffekt auftritt.
(JANSEN, 1982)

Erst die Arbeit VAN'T HOFFS zur Siedepunktserhöhung und Gefrierpunkts-erniedrigung von Lösungen brachten im Jahre 1886 den Durchbruch für die Theorie der elektrolytischen Dissoziation (JANSEN, 1982). Die Hydratation der Ionen in wäßriger Lösung erklärt, wie die Aufspaltung der Verbindungen in ihre Ionen möglich ist.

Viele Schülervorstellungen habe eine Entsprechung in der geschichtlichen Entwicklung der Wissenschaften. DUIT (1990) beschreibt einige der in der Literatur diskutierten Erklärungsansätze für dieses Phänomen:

- Die Schülervorstellungen beruhen auf den gleichen Sinneseindrücken wie die 'historischen' Vorstellungen.
- Die Vorstellungen sind nicht erlernt, sondern beruhen auf der angeborenen Struktur des Gehirns, die sich im Verlaufe der Evolution an die zu bewältigenden Sinneseindrücke angepaßt hat.
- Auch für die Entwicklung von Vorstellungen gilt das "Biogenetische Grundgesetz" der "Parallelität von Phylogenese und Ontogenese" (DUIT, 1990). Demnach durchläuft der Mensch während der Entwicklung seines Wissens die Entwicklungsgeschichte der gesamten Menschheit.

⁵³ Zur Geschichte der Elektrochemie siehe: BUGGE (1965), DUNSCH (1985), FARADAY (1897), (Fortsetzung auf der nächsten Seite)

- Die Parallelitäten zwischen den Schülervorstellungen und den 'historischen' Vorstellungen werden von den Forschern, die Schülervorstellungen untersuchen und sich in der Wissenschaftsgeschichte auskennen, selbst erzeugt.

Der hier beschriebene Vergleich der Schülervorstellungen mit der Wissenschaftsgeschichte dient jedoch nur einem Zweck: Es soll gezeigt werden, daß es sich bei den 'falschen' Vorstellungen der Schüler nicht um schlechte Leistungen handelt. Ein Schüler, der eine der hier beschriebenen falschen Vorstellungen beschreibt, hat sich diese mit hoher Wahrscheinlichkeit selbst ausgedacht – er kann sie nicht aus einem Buch entnommen haben⁵⁴. Dabei denken die Schüler oft logisch und beweisen analytisches Denkvermögen. Der Vergleich der Schülervorstellungen mit Vorstellungen anerkannter Wissenschaftler kann von einem Forscher, der sich als Anwalt seiner Interviewpartner versteht, angeführt werden, um die große intellektuelle Leistung, die sich hinter diesen 'Fehlern' verbirgt, zu verdeutlichen.

In allen Interviews folgt die Beschreibung eines Elektronenflusses durch die Lösung aus der Annahme, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis von einer Elektrode zur anderen gelangen müssen (s. Kap. 5.3.3). Erst aus dieser Annahme heraus entwickeln sich die im folgenden beschriebenen Vorstellungen zum Leitungsmechanismus im Elektrolyten. Das wird im Interview mit S4 besonders deutlich. Er stellt zunächst lediglich fest, daß Elektronen durch die Lösung gelangen können.

Diese Vorstellung wurde auch in anderen Untersuchungen gefunden.

Die Schülerkommentare wiesen auf drei Falschvorstellungen bezüglich des Leitungsmechanismus in wäßrigen Lösungen hin:

[a] Elektronen bewegen sich von einer Elektrode zur anderen durch die Lösung

(MAROHN, 1999, Seite 83)

HERMANN (1986), JANSEN (1982), OSTWALD (1896), PIOSK ET AL. (1991).

⁵⁴ Es sei denn, in einem Buch wird eine Formulierung verwendet, die eine solche falsche Vorstellung nahelegt.

Misconception 2e. Electrons flow in electrolytes.
(GARNETT & TREAGUST 1992a)

The interviews revealed that many pupils and students think that free electrons conduct current in the electrolyte.
(OGUDE & BRADLEY, 1994)

Misconception 10e (electrons can flow through aqueous solutions without assistance from the ions).
(SANGER & GREENBOWE, 1997)

Als der Interviewer S4 bittet, die Vorgänge in der Lösung genauer zu beschreiben, sagt dieser, daß der Ladungstransport mit Hilfe von in der Lösung enthaltenen Metallen stattfindet. Diese Vorstellung beschreiben auch BUTTS & SMITH.

[...] students predicted that a solution of silver nitrate would conduct an electric current [...] four [students] explained the expected conductivity as due to the presence of silver, a metal and hence a conductor!
(BUTTS & SMITH, 1987b)

Später kommt der Schüler zu dem Schluß, daß an der Elektrode, die Elektronen an den inneren Stromkreis abgibt, negative Anionen entstehen müssen. Das schließt er daraus, daß sich in der Lösung sonst nur die in den Reaktionsgleichungen vorgegebenen Kationen befänden (s. Kap. 5.4.1). Von nun an geht er davon aus, daß diese Anionen die Elektronen durch die Lösung transportieren und sie an der anderen Elektrode wieder abgeben. Ein solcher Leitungsmechanismus, bei dem in der Lösung Teilchen als Elektronentransporter fungieren, wird auch von anderen Schülern beschrieben und ist in der Literatur über Schülervorstellungen zu finden.

The idea that "ions just convey the electrons across and complete the circuit" was common. One student used the rather colourful analogy of "ions ferrying the electrons from one electrode to the other".
(BUTTS & SMITH, 1987b)

Misconception 2i. When an electrolyte conducts a current, electrons move onto an ion at the cathode and are carried by that ion to the anode.
(GARNETT & TREAGUST, 1992a)

Die Schülerkommentare wiesen auf drei Falschvorstellungen bezüglich des Leitungsmechanismus in wäßrigen Lösungen hin:
[...]

[b] Ionen nehmen Elektronen an einer Elektrode auf und transportieren diese zur anderen Elektrode durch die Lösung (MAROHN, 1999, Seite 83)

Eine Variante der Vorstellung von Teilchen, die als Elektronentransporter fungieren, ist die, daß Elektronen in der Lösung von einem Ion zum nächsten gereicht werden. Sie wird auch an anderer Stelle beschrieben.

Misconception 2h. Electrons move through solution by being attracted from one ion to another.
(GARNETT & TREAGUST, 1992a)

Die Schülerkommentare wiesen auf drei Falschvorstellungen bezüglich des Leitungsmechanismus in wäßrigen Lösungen hin:

[...]

[c] Elektronen werden von einem Ion zum nächsten durch die Lösung weitergereicht
(MAROHN, 1999, Seite 83)

Das Interview mit S9 legt die Vermutung nahe, daß dieser Leitungsmechanismus die Vorstellung von dynamischen chemischen Gleichgewichten voraussetzt. Nur so läßt sich erklären, daß ein Ion, welches Elektronen aufgenommen hat, diese sofort wieder an das nächste Ion abgibt.

Andere, von den Schülern beschriebene Leitungsmechanismen beruhen auf den besonderen Eigenschaften des Wassers. So stellt sich S9 vor, daß Ionen das Wasser leitfähiger machen, weil sie die Wasserstoffbrückenbindungen zerstören und so Zwischenräume schaffen, durch die Elektronen gelangen können. S6 beschreibt einen Mechanismus, bei dem Elektronen durch eine Kette von "Wasserstoffbindungen" weitergegeben werden. Dieser Mechanismus erinnert an den GROTHUS'SCHEN Mechanismus.

Die von den Schülern für den Elektrolyten beschriebenen, falschen Leitungsmechanismen gehen alle von der Annahme aus, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis von einer Elektrode zur anderen gelangen müssen.

Das Aufgeben dieser Annahme (s. Stellungnahme 6) scheint eine Voraussetzung für die Aufgabe der falschen Leitungsmechanismen zugunsten der naturwissenschaftlichen Vorstellungen zu sein.

Stellungnahme 10: Annahme eines Elektronenflusses durch den inneren Stromkreis hat Folgen

S1 und S4 haben Probleme damit, daß sich Ionen in der Lösung zu einer Elektrode mit der gleichen Ladung bewegen. Dieses Problem tritt bei der galvanischen Zelle auf, wenn der Schüler die Elektroden richtig mit Pluspol und Minuspol beschriftet. Dies wird auch von MAROHN (1999) beschrieben.

Eine besondere Schwierigkeit bereitete die Richtung des Ladungstransportes in galvanischen Zellen. Aufgrund ihrer Kenntnisse über die gegenseitige Anziehung ungleichnamiger Ladungen gaben viele Schüler an, daß sich negative Ionen in Richtung des Pluspols, positive Ionen in Richtung des Minuspols bewegen müssen.

(MAROHN, 1999, Seite 2)

Wenn man unter der Elektrode die elektronenleitende Phase versteht, ist es schwer einzusehen, daß sich im Elektrolyten einer galvanischen Zelle negative Ionen zum Minuspol und positive Ionen zum Pluspol bewegen. Dies wird erst klar, wenn man die Vorstellung einer elektrischen Doppelschicht⁵⁵ an der Grenzfläche zwischen Elektronenleiter und Elektrolyten zu Hilfe nimmt. In diesem Modell beschreibt die innere HELMHOLTZ-Ebene die Ladung in dem Elektronenleiter. Die äußere HELMHOLTZ-Ebene wird von den im Elektrolyten gelösten Ionen gebildet und hat eine der inneren HELMHOLTZ-Ebenen entgegengesetzte Ladung. Sie ist für die Richtung des elektrischen Stroms im Elektrolyten verantwortlich.

Zu einer solchen Beschreibung kommt S4, der sich bei der Elektrolysezelle darüber wundert, daß negative Anionen zur negativen Elektrode wandern. Er stellt sich vor, daß sich in der Nähe der Elektrode viele positive Ionen befinden, die ihrerseits Anionen anziehen.

Der Austausch von Ionen zwischen den beiden Lösungen der galvanischen Zelle ist hingegen einfacher zu verstehen. Entstehen beispielsweise an der Elektrode positive Ionen, so muß die Lösung, in der sich diese Elektrode befin-

⁵⁵ Hier wird von dem HELMHOLTZ-Modell ausgegangen, daß zwar den Einfluß der thermischen Bewegung vernachlässigt (ATKINS, 1990, Seite 812ff; HAMANN & VIELSTICH, 1998, Seite 108ff; VETTER, 1961, Seite 68ff), für die Elektrochemie in der Schule aber ausreichend sein dürfte.

det, um elektrisch neutral zu bleiben, entweder positive Ionen an die andere Lösung abgeben oder negative Ionen von ihr aufnehmen.

In der galvanischen Zelle bewegen sich negative Ionen auf die negative Elektrode und positive Ionen auf die positive Elektrode zu. Diese Tatsache stellt eine erhebliche Lernschwierigkeit dar, die nur durch eine genauere Betrachtung der Vorgänge an den Elektroden überwunden werden kann. Einfacher zu verstehen ist der Austausch von Ionen zwischen den beiden Lösungen der galvanischen Zelle.

Stellungnahme 11: Problem: in einer galvanischen Zelle bewegen sich negative Ionen zur negativen Elektrode

5.5 Diaphragma

Die meisten der befragten Schüler haben erhebliche Probleme damit, die Vorgänge im Diaphragma zu beschreiben. Einige von ihnen stellen fest, daß auf dieses Thema im Unterricht nicht ausreichend eingegangen wurde.

[S3:] Also, ich kann es mir jetzt nur so vorstellen, daß durch das Diaphragma wirklich die Ladungen ausgetauscht werden [...] Wie gesagt, das wird im Unterricht immer nur so plausibel dargelegt: da passiert der Ladungsaustausch beim Diaphragma. Und das war's dann. Wie man sich so etwas im Diaphragma vorstellt, oder am Diaphragma, .. wüßte ich nicht. [0:14 – Skizze 1]

[I:] **Also, hast du eine Vorstellung, wie diese Elektronen überführt werden [durch das Diaphragma]? ..**

[S10:] Nee, eigentlich überhaupt nicht.

[...]

Also, das ist alles recht abstrakt [...] was wir gemacht haben. Also, da wird immer von Ladungen gesprochen und so. Aber was da eigentlich passiert, das ist eigentlich mehr im Dunkeln – würde ich sagen. Wobei das im Grunde ja auch das Interessante daran ist. [0:14 – Skizze 1]

Manche Schüler gehen davon aus, daß das Diaphragma ein Vermischen der Lösungen verhindert. Diese Annahme ist im Prinzip richtig, kann aber zu problematischen Schlußfolgerungen führen (Kap. 5.5.1).

Für welche Teilchen das Diaphragma aus Schülersicht durchlässig ist, wird in den Kapiteln 5.5.2 und 5.5.3 beschrieben. In Kapitel 5.5.3 deutet sich an, daß hier möglicherweise Wissen aus dem Biologieunterricht auf die Elektrochemie übertragen wird.

Eine ausführliche Diskussion ist in Kapitel 5.5.4 zu finden.

5.5.1 Diaphragma verhindert Vermischen der Lösungen

S3, S4, S6 und S8 geben an, daß das Diaphragma das Vermischen der Lösungen verhindert.

[S8:] [In dieser Skizze] ist es wieder vorhanden, das Diaphragma. ..[Beschriftung "Diaphragma".. Und da ist [es] eben halt [dafür], daß die beiden Lösungen sich nicht vermischen [0:21 – Skizze 2]

Für S6 ist das nötig, um eine direkte Redoxreaktion zu verhindern. Er weiß nicht, ob das Diaphragma eine vollständige Trennung bewirkt oder ob es Elektronen durchläßt.

[S6:] [Die] Funktion der Trennung sehe ich in dem Fall [darin], daß ansonsten die Elektronen lieber zu diesen Kupferionen gehen würden. Da [...] diese natürlichen Kräfte dieser edleren und unedleren Metalle dann wieder wirken würden. [1:07]

S3 und S4 schließen daraus, daß das Diaphragma das Vermischen verhindert, daß keine Teilchen (S4) bzw. keine Zink- und Kupferionen (S3) durch die Trennwand hindurch können.

Beide gehen jedoch davon aus, daß das Diaphragma einen Ladungstransport zuläßt.

[S4:] Also, wir haben gesagt, die Lösungen vermischen sich nicht durch dieses Diaphragma. Das ist nicht möglich, daß diese Teilchen da durchkommen, aber halt diese [...] Ladungen [...] können da hindurch wandern, ohne Störung. [...] ... Aber genau den Vorgang, den könnte ich nicht schildern. [0:34]

5.5.2 Durchlässigkeit des Diaphragmas

Bis auf S9 gehen alle befragten Schüler wenigstens bei einer der beiden Zellen davon aus, daß etwas durch das Diaphragma gelangen muß. S9 diskutiert für beide Skizzen zwei Fälle – mit durchlässiger und mit undurchlässiger Trennwand (s. Kap. 5.1.3).

Die Schüler S3, S7 und S8 liefern eine Beschreibung des Diaphragmas, die sich im Verlaufe der Interviews nicht verändert.

S3 geht davon aus, daß nur Elektronen durch das Diaphragma von der einen Zelle in die andere gelangen können.

S7 und S8 gehen davon aus, daß nur H^+ und OH^- -Ionen durch das Diaphragma hindurch fließen⁵⁶. Dadurch wird der Ladungsausgleich zwischen den Lösungen bewerkstelligt (s. Kap. 5.3.2.2 – Ladungsausgleich zwischen den Lösungen ist kein Stromfluß).

[S8:] [Bei der] Trennwand ist das so, [daß] die eben halt wieder nur H^+ und OH^- Ionen durchläßt. Halt zum Ladungsausgleich der beiden Lösungen. [0:21 – Skizze 2]

S6 stellt sich die Frage, ob das Diaphragma Elektronen durchläßt oder ob es eine vollständige Trennung zwischen den Lösungen bewirkt. Im Verlauf des Gespraches gelangt er jedoch zu der Ansicht, daß keine Elektronen durch den inneren Stromkreis gelangen können (s. Kap. 5.3.2.2 – Argumente gegen einen Elektronentransport durch den inneren Stromkreis). Daraus schließt er, daß es für die beiden Zellen keine Rolle spielt, ob das Diaphragma für Elektronen durchlässig ist oder nicht. Er sagt, daß ein Aufbau mit zwei vollständig getrennten Bechergläsern deutlicher wäre.

[S6] Die [Elektronen] brauchen ja nicht überwechseln. Die werden ja hier [an der Elektrode, an der die Reduktion stattfindet] verbraucht. Somit würde es gar keine Rolle spielen, ob die da überhaupt rüber kommen .. könnten. [0:45 – Skizze 2]

[S6:] Und dann halt wie gesagt mit dieser Membran, die ja – wie ich jetzt erkannt habe zum Schluß – eigentlich gar keine bedeutende Rolle mehr spielt. Oder diese Trennung dazwischen. Also wären jetzt zwei einzelne Bechergläser auseinander gezeichnet, wäre diese Trennung ja automatisch definiert, durch diesen Abstand dazwischen. Also dann wäre es vielleicht noch deutlicher geworden.

[I:] **Daß die überhaupt nichts miteinander zu tun haben.**

[S6:] Daß die separate Systeme sozusagen bilden. [0:47 – Skizze 2]

Die übrigen Schüler (S1, S2, S4, S9 und S10) überlegen, ob Elektronen oder Ionen durch das Diaphragma hindurch von der einen Lösung in die andere gelangen.

S1 geht davon aus, daß die Trennwand so ausgewählt werden muß, daß sie für Zn^{2+} - und Cu^{2+} -Ionen "geeignet" ist, diese Ionen also durch das Diaphragma gelangen können. Ist das der Fall, so können auch Elektronen durch die

⁵⁶ Diese beiden Schüler sind im selben Chemiekurs.

Trennwand hindurch, da sie kleiner sind als die Ionen. S1 ist sich nicht sicher, ob die Elektronen durch die Trennwand zu den Ionen, mit denen sie reagieren, wandern, oder ob die Ionen durch die Trennwand zu den Elektronen wandern⁵⁷ (s. Kap. 5.2.2.1). Er entscheidet sich für letzteres, da die Trennwand für die Ionen "geeignet" sein muß.

[I:] Wir können ja beide Wege mal ganz kurz durchspielen. Also, wenn jetzt Kupfer zu den Elektronen gehen würde. Welchen Weg würde das dann nehmen?

[S1:] Durch die poröse Trennwand. Hier durch zu diesen Elektronen. [Beschriftung "8e⁻" in der linken Elektrolytlösung] Ja, dazu ist die poröse Trennwand ja da. Die muß ja für Kupfer und Zink durchlässig sein.

[I:] Und wenn wir mal einen Moment annehmen – die Elektronen würden zum Kupfer gehen. Wie würden die dann gehen?

[S1:] Ja, auch hier den Weg durch die poröse Trennwand. Ja, die müssen da sowieso durch können. Weil sie ja viel kleiner sind.

[I:] Was denkst du jetzt, was eher passiert? Das eine oder das andere oder beides?

[S1:] Ich denke eher an das erste, also daß Kupfer zu den Elektronen – in Anführungsstrichen – geht. Weil, sonst würde man ja auch keine ... doch – mit dieser porösen Trennwand – ich meine, die muß ja für beide Stoffe geeignet sein, [...] für Zink und Kupfer und sonst würde man ja ganz normale ... Trennmaterie nehmen oder so was, was nur für Elektronen durchlässig sein sollte. ... Also – wie gesagt – ich denke eher, daß Kupfer auf die andere Seite diffundiert. [0:54 – Skizze 1]

S2 geht an unterschiedlichen Stellen des Interviews einmal davon aus, daß Elektronen durch das Diaphragma gelangen und einmal davon, daß es positive Ionen durchläßt.

S4 paßt seine Beschreibung des Diaphragmas dem jeweils von ihm beschriebenen Leitungsmechanismus im Elektrolyten an (s. Kap. 5.4.2.1). So sagt er zunächst, daß Elektronen durch das Diaphragma gelangen. Später, als er davon ausgeht, daß Anionen ("A²⁻") Elektronen von einer Elektrode zur anderen transportieren, beschreibt er, daß diese Anionen durch das Diaphragma fließen.

[S4:] [...] wandern diese Elektronen und werden durch dieses Diaphragma transportiert [23:07]

⁵⁷ S1 geht davon aus, daß der Elektronenaustausch zwischen den Teilreaktionen bei der galvanischen Zelle durch den inneren Stromkreis stattfindet.

[S4:] Und hier ist dann auch wieder [...] die Wanderung von Ionen [...] möglich, durch dieses Diaphragma und dieses Anion [Beschriftung an der Cu-Elektrode: "A²⁻"] – dieses zweifach geladene [...] das wandert dann jetzt hier zu der – bei der Galvanolyse – zu der Kathode und es werden halt diese zwei Elektronen abgegeben [0:40 – Skizze 1]

S9⁵⁸ und S10 sagen zunächst, daß Elektronen durch das Diaphragma gehen. Sie geben diese Vorstellung jedoch fast sofort wieder auf. Grund dafür sind ihre Argumente gegen einen Elektronenfluß im inneren Stromkreis (s. Kap. 5.3.2.2). Sie gehen dann davon aus, daß Sulfationen durch das Diaphragma von der einen Lösung in die andere gelangen.

Auch wenn S2, S3, S4 und S10 davon ausgehen, daß Elektronen durch das Diaphragma gelangen, so heißt dies nicht, daß freie Elektronen durch die Lösungen fließen.

Beispielsweise geht S3 davon aus, daß Elektronen durch das Diaphragma zwischen den Teilchen ausgetauscht werden, welche die Elektronen durch die Lösung transportieren (s. Kap. 5.4.2.1).

S10 sagt, daß die "Potentialdifferenz" am Diaphragma "am stärksten zum Tragen kommt", da sich die Lösungen dort berühren. Daher lösen sich die Elektronen dort von einem Teilchen und werden irgendwie durch das Diaphragma transportiert. Elektronen kommen in der Lösung nicht frei vor, sie sind an Atome oder Moleküle gebunden.

[I:] Das bedeutet jetzt – nur, damit ich dich verstehe – [...], daß die Elektronen durch diese Membran gehen.

[S10:] Ja.

[I:] Ja, und du hattest vorhin noch etwas anderes gesagt, mit frei werden. [Die Beschreibungen hier beziehen sich auf das, was am Diaphragma stattfindet.]

[S10:] Ja, auf dieser Seite hier, ja die müssen ja irgendwie [...]. Die sind ja .. [...] in so einem Molekül, in den Atomen sind die ja irgendwie gebunden. Hängen da in ihren Schalen drin [...]. Also, ich meine [...] Elektronen, die fliegen ja auch nicht frei da irgendwie durch die Gegend. [...]

[I:] Also die müssen erst mal wieder frei werden?

[S10:] [...] Ja, denke ich schon. [0:28 – Skizze 1]

⁵⁸ Für den von ihm beschriebenen Fall einer durchlässigen Trennwand.

[S10:] Also, wenn [...] dann [...] würde ich davon ausgehen, daß das praktisch direkt an dieser Membran hier passiert, weil [...] ich mir vorstellen könnte, daß praktisch hier – wo sich diese beiden Lösungen [...] fast berühren – ja, daß da eben diese Differenz am [...] stärksten zum Tragen kommt und vielleicht auch so eine Art Sogwirkung ausüben könnte. Daß also [...] da vielleicht wirklich Elektronen aus oder freie Elektronen irgendwie aus ihrer Schale da raus gerissen werden. Also, das wäre ja die einzige Möglichkeit. [0:32 – Skizze 1]

Aus der Aussage, daß Elektronen durch das Diaphragma fließen, kann folglich nicht auf die Vorstellung geschlossen werden, daß freie Elektronen durch die Lösungen fließen.

5.5.3 Semipermeable Membran

Die Schüler S1, S2 und S10 bezeichnen das Diaphragma unter anderem als "semipermeable Membran". Eine semipermeable Membran ist nur für bestimmte Teilchen durchlässig.

[S2:] Das soll hier so eine Membran sein, in der Mitte von diesem Becherglas. Ich denk mal – da sie auch dünner gedruckt ist – ist das eine, für gewisse Teilchen, durchlässige Membran. [0:02 – Skizze 1]

[S2:] [...] das könnte auch was anderes sein, aber da ich mich noch so schwach erinnere, denke ich mal das ist eine .. Membran, eine semipermeable Membran. [0:12 – Skizze 1]

S10 gibt an, daß er aus dem Biologieunterricht weiß, daß eine semipermeable Membran nur Wasser durchläßt. Dies spielt beim Thema Osmose eine wichtige Rolle.

Durch die semipermeable Membran wird ein Konzentrationsgefälle zwischen zwei Lösungen dadurch ausgeglichen, daß die stärkere Lösung durch das Wasser, welches durch die Membran fließt, verdünnt wird.

[S10:] Also, ich habe mir das immer so ähnlich vorgestellt, wie bei Biologie Osmose. [...] An einer permeablen Membran.

[I:] **Beschreibe mir das doch mal kurz, [...] dann halt, wie du das dann auf die Elektrochemie beziehst.**

[S10:] [...] Bei Bio, da geht es dann um Ionenkonzentrationen von bestimmten Stoffen, die praktisch eine Art Anziehungskraft auf Wasser ausüben. Und wenn das an Ganze an einer permeablen oder semipermeablen Membran stattfindet, [...] dann wird versucht, das Konzentrationsgefälle, was da herrscht, auszugleichen. Dadurch, daß Wasser durch diese Membran auf die andere Seite geht und verdünnt – die [...] stärkere Sache. [0:12 – Skizze 1]

S10 versucht, diese Vorstellung auf die Elektrochemie zu übertragen, was ihm jedoch nicht gelingt. Er bricht diesen Versuch ab, weil er zu dem Schluß

kommt, daß der Wasserspiegel in den beiden Halbzellen unterschiedlich hoch sein müßte, wenn Wasser durch die Membran flöße. Das kann er sich jedoch wegen der Schwerkraft, die auf die Flüssigkeiten wirkt, nicht vorstellen⁵⁹.

[S10:] Ja, ich meine es kann ja schlecht Wasser von hier, [rechte Halbzelle] daß der Pegel da [rechte Halbzelle] niedriger wird und hier [linke Halbzelle] höher. Das kann ja nicht passieren. [0:22 – Skizze 1]

5.5.4 Diskussion

Bei dem Daniell-Element tauchen die beiden Elektroden in unterschiedliche Lösungen ein. Ein Vermischen der Lösungen muß verhindert werden, damit die Kupferionen nicht direkt an der Zinkelektrode mit dem Zink reagieren. Gleichzeitig muß ein Ladungsausgleich zwischen den beiden Lösungen möglich sein. Um das zu erreichen, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die sich zwei Kategorien zuordnen lassen: Verbindungen, bei denen ein Diffusionspotential auftritt und Verbindungen, bei denen das Diffusionspotential so stark herabgesetzt ist, daß es als unterdrückt angesehen werden kann. Bei der Darstellung von elektrochemischen Zellen in Zellsymbolen wird zwischen den beiden Verbindungstypen unterschieden.

A single vertical bar (|) should be used to represent a phase boundary, a dashed vertical bar (|:) to represent a junction between miscible liquids, and double, dashed vertical bars (|:|) to represent a liquid junction, in which the liquid junction potential has been assumed to be eliminated.
(IUPAC, 1974)

Das Diffusionspotential an der Kontaktstelle zweier Lösungen entsteht durch die unterschiedliche Beweglichkeit verschiedener Ionensorten. Es kann mit Hilfe einer Salzbrücke stark reduziert werden⁶⁰. Dies ist notwendig, da sich das Diffusionspotential schwer bestimmen läßt.

⁵⁹ Genau das passiert jedoch bei einem Aufbau, der aus zwei Lösungen besteht, in denen Teilchen in unterschiedlicher Konzentration gelöst sind, die durch eine semipermeable Membran getrennt sind. Die Höhe der beiden Wassersäulen stellt sich dann so ein, daß der hydrostatische Druck den osmotischen Druck ausgleicht.

⁶⁰ Eine Salzbrücke besteht üblicherweise aus einem mit gesättigter Kaliumchloridlösung getränkten Filterpapier oder aus einem Glasrohr, in dem sich die Kaliumchloridlösung in (Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Da die allgemeine Berechnung des Diffusionspotentials für beliebige Elektrolyte nicht einfach und ihre experimentelle Bestimmung schwierig ist, wird sie im allgemeinen durch experimentelle Maßnahmen eliminiert. Eine dieser Maßnahmen besteht in der Verwendung einer KCl-Brücke zum Verbinden der einzelnen Halbzellen.

(BERGMANN & SCHAEFFER, 1971, Seite 83)

Die Vorgänge in einem Diaphragma – das das Diffusionspotential nicht unterdrückt – sind einfacher zu erklären als die in einer Salzbrücke. Daher sind die Halbzellen in den für die Interviews verwendeten Skizzen durch ein Diaphragma voneinander getrennt (s. Kap. 4.2.1).

In den meisten der bisher veröffentlichten Untersuchungen wurden galvanische Zellen mit Salzbrücken benutzt (GARNETT & TREAGUST, 1992a; b; SANGER & GREENBOWE; 1997a; b; OGUDE & BRADLEY 1994). Daher können diese Untersuchungen hier nicht zum Vergleich mit den Ergebnissen der vorliegenden Interviewstudie herangezogen werden. MAROHN (1999) verwendet bei ihren Aufgaben Zellen mit Salzbrücken und Zellen mit Diaphragmen. Dabei stellt sie fest, daß der Anteil der Schüler, die in ihrer Untersuchung einen Elektronenfluß durch den inneren Stromkreis beschreiben, für eine Zelle mit einer Salzbrücke größer ist als für eine Zelle mit einem Diaphragma (s. Kap. 5.3.3, Seite 112).

Die Vorgänge in einem Diaphragma sind leichter zu erklären als die in einer Salzbrücke. Daher sollte im Unterricht ein Diaphragma verwendet werden, wenn das Diffusionspotential nicht unterdrückt werden muß. Dem steht entgegen, daß sich ein Aufbau mit einem Filterpapier als Salzbrücke in der Praxis oft leichter realisieren läßt als ein Aufbau mit einem Diaphragma.

Stellungnahme 12: Diaphragma oder Salzbrücke?

Agar-Agar-Gel befindet. Die genaue Funktionsweise beschreibt beispielsweise ATKINS (1990).

S3 und S4 wissen, daß das Diaphragma ein Vermischen der Lösungen verhindern soll. Daraus schließen sie, daß Ionen nicht durch das Diaphragma hindurch gelangen können, da sich die Lösungen sonst mischen müßten⁶¹. Hier zeigt sich, wie logisch die Schüler denken. Eine optimale Trennwand würde etwas ähnliches leisten. Sie würde den Ladungsausgleich zwischen den beiden Elektrolyten ermöglichen und wäre gleichzeitig für bestimmte Ionensorten undurchlässig. In einer Apparatur, wie sie in der Schule verwendet wird, mischen sich die Lösungen. Dieser Vorgang findet jedoch sehr langsam statt.

Die tatsächlichen Vorgänge an einem Diaphragma können sehr kompliziert sein. Es sind Adsorptionsvorgänge an der Oberfläche des Diaphragmas oder ein Ionenaustausch mit dem Material der Trennwand denkbar. Dadurch können sich die Beweglichkeiten der Ionen im Diaphragma stark von denen in den Lösungen unterscheiden. Durch solche Vorgänge ist es prinzipiell möglich, daß ein Diaphragma ein Vermischen der Lösungen verhindert, indem es für die entscheidenden Ionensorten praktisch undurchlässig ist.

Eine stark vereinfachte aber für die Schulchemie ausreichende Beschreibung der Vorgänge am Diaphragma erhält man, wenn man annimmt, daß es sich um eine poröse Trennwand handelt, die für alle Ionensorten und für Wasser durchlässig ist, aber makroskopische Strömungen, wie sie zum Beispiel durch Konvektion auftreten können, verhindert. Dadurch kann ein Ladungsausgleich zwischen den Lösungen stattfinden. Die Ionen diffundieren aufgrund des Konzentrationsgefälles durch das Diaphragma hindurch. Dieser Vorgang ist jedoch so langsam, daß sich die Lösungen während der Versuchszeit nicht merklich mischen. Wenn man das Auftreten makroskopischer Strömungen verhindert, kann man auf das Diaphragma verzichten. Zur Veranschaulichung stelle man sich vor, daß eine Kupfersulfatlösung vorsichtig über eine Zinksulfatlösung geschichtet wird. So entstehen zwei Phasen. Sorgt man außerdem für eine homogene Temperatur in dem Gefäß, um Konvektionsströmungen zu vermeiden, so durchmischen sich die beiden Lösungen nur durch Diffusion und somit

⁶¹ S3 und S4 gehen jedoch davon aus, daß das Diaphragma einen Ladungsausgleich zuläßt.

langsam⁶². Wenn man seitlich eine Kupfer- und eine Zinkelektrode in die Lösungen bringt, kann man diesen Aufbau für eine gewisse Zeit als galvanisches Element betreiben⁶³.

Die Aussagen, daß das Diaphragma ein Vermischen der Lösungen verhindert und daß es alle Ionen durchläßt, sind widersprüchlich. Dieses Problem kann durch einen Vergleich der Zeiträume, in denen sich die Lösungen durch Diffusion und durch makroskopische Strömungen mischen, gelöst werden. Korrekt müßte es heißen: Das Diaphragma verhindert für die Dauer des Versuchs ein merkliches Vermischen der Lösungen.

Stellungnahme 13: Wie kann eine Trennwand, die Ionen durchläßt, verhindern, daß sich die Lösungen mischen?

Wenn man davon ausgeht, daß die Trennwand ein Vermischen der Lösungen verhindert, indem sie keine Ionen durchläßt, so muß der Ladungstransport auf anderem Wege stattfinden. Dafür kann man beispielsweise einen Austausch von Elektronen durch das Diaphragma annehmen⁶⁴. Man kann aber beim Da-

⁶² Für eine grobe Abschätzung des Abstands von der Trennschicht, in dem nach einer bestimmten Zeit, eine merkliche Vermischung der Lösungen auftritt, wird oft das mittlere Abstandsquadrat x^2 herangezogen. Es kann für die gegebenen Anfangs- und Randbedingungen aus dem zweiten FICK'SCHEN Gesetz berechnet werden. x^2 gibt an, welche Strecke ein Teilchen im Zeitraum t durch Diffusion zurücklegt. Für eine, dem hier beschriebenen Fall ähnliche Situation gilt: $x^2 = 2Dt$ (MOORE, 1986, Seite 191ff)

D ist der Diffusionskoeffizient. Er hat bei Flüssigkeiten typischerweise Werte der Größenordnung $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (FALBE & REGITZ, 1997).

Setzt man für die Dauer des Versuchs eine (Schul-) Doppelstunde an (mit Pause ca. 100 min), so ergibt sich für $(x^2)^{1/2}$ ein Wert von wenigen Millimetern. Dieser stellt den Abstand von der Trennschicht dar, in dem sich die Lösungen nach der gegebenen Zeit merklich vermischt haben. Nach einem Tag beträgt dieser Abstand etwa einen Zentimeter und nach einer Woche ungefähr drei Zentimeter.

⁶³ Diese Idee stammt aus einem Gespräch mit Prof. Dr. Pohl von der Universität Dortmund.

⁶⁴ Durch ein Diaphragma werden keine freien Elektronen ausgetauscht. Es ist jedoch denkbar, daß die beiden Lösungen durch eine Metallwand voneinander getrennt werden. In diesem Fall könnte an der einen Seite der Metallwand eine Oxidation und an der anderen Seite eine Reduktion stattfinden. Ein Ladungsausgleich zwischen den Lösungen durch einen Austausch von freien Elektronen ist also prinzipiell möglich.

Eine solche Metallwand stellt eine *bipolare Elektrode* dar. In der Technik werden in *bipolaren Zellen* jeweils Anode und Kathode mehrerer benachbarter, in Serie geschalteter Zellen miteinander vereinigt. Dabei können die *bipolaren Elektroden* entweder aus einem

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

niell-Element auch davon ausgehen, daß nur der Austausch von Cu^{2+} - und Zn^{2+} -Ionen verhindert werden muß. Demnach dürfte das Diaphragma für andere Ionen, wie z. B. H^+ , OH^- , SO_4^{2-} oder A^{2-} (S4) durchlässig sein. Das kann auch der Grund dafür sein, daß einige Schüler von einer "semipermeablen Membran" sprechen (S1, S2, S10). Hier soll nicht behauptet werden, die Vorstellungen, Elektronen bzw. nur die obigen Ionen seien für den Ladungstransport durch das Diaphragma verantwortlich, resultierten aus der Annahme, daß das Diaphragma ein Vermischen der Lösungen verhindert. Die Erkenntnis, daß sich die Lösungen durch Diffusion nur langsam miteinander vermischen, scheint aber eine Voraussetzung für die oben beschriebene vereinfachte Darstellung der Vorgänge am Diaphragma zu sein.

Einige Schüler äußern, daß die Vorgänge am Diaphragma in ihrem Unterricht nicht thematisiert wurden. Es wurde lediglich erklärt, daß es zum Ladungsausgleich notwendig ist. Möglicherweise ist das der Grund dafür, daß S10 auf Vorstellungen zurückgreift, die er aus dem Biologieunterricht kennt und von einer "semipermeablen Membran" spricht.

Der Stellenwert, den das Diaphragma in den Interviews hat, hängt sicherlich mit der gestellten Aufgabe und mit dem Verhalten des Interviewers zusammen. Dennoch kann festgestellt werden, daß die Aussage, das Diaphragma sei zum Schließen des Stromkreises notwendig, den Schülern keine ausreichende Erklärung bietet.

Stellungnahme 14: Was verbirgt sich hinter dem Diaphragma?

Das Diaphragma ist eine poröse Tonwand, die mit einer Salzlösung getränkt ist. Ausgehend von dieser Vorstellung liegt es nahe, anzunehmen, daß für das Diaphragma der gleiche Leitungsmechanismus gilt wie für die Lösungen. Da einige Schüler jedoch nicht wissen, wie das Diaphragma beschaffen ist, teilen

sie diese Annahme nicht. Daher kann aus der Aussage eines Schülers, daß Elektronen durch das Diaphragma fließen, nicht direkt gefolgert werden, daß dieser auch einen Fluß freier Elektronen durch die Lösungen annimmt. Dies wird in den Interviews mit S3 und S10 deutlich. So beschreibt S3 einen Mechanismus, bei dem Elektronen mit Hilfe von Teilchen, die als Elektronentransporter fungieren, durch die Lösungen transportiert werden. Am Diaphragma tauschen zwei Elektronentransporter Elektronen aus⁶⁴.

Ein Schüler, der beschreibt, daß Elektronen durch das Diaphragma gelangen, geht nicht unbedingt davon aus, daß sich freie Elektronen durch die Lösungen bewegen.

Stellungnahme 15: Elektronenfluß im Diaphragma \neq Elektronenfluß in den Lösungen

5.6 Benutzung von Begriffen

Bei der Analyse der Interviews wurde auf die Kommunikation zwischen Schüler und Interviewer geachtet. Dabei sollte festgestellt werden, welche Bedeutung die Interviewten den von ihnen benutzten Begriffsnamen zuordnen. Das ist notwendig, um zu gewährleisten, daß der Forscher die Schüler richtig versteht. Zur Validierung wurden die Schüler am Ende der Interviews gebeten, die von ihnen verwendeten Fachwörter zu definieren (s. Kap. 4.2).

Die Untersuchung der Kommunikation dient vor allem der Validierung der Interpretation. Einige Ergebnisse dieser Untersuchung sind jedoch auch im Hinblick auf den Chemieunterricht interessant. Auch im Unterricht kommuniziert der Lehrer mit den Schülern und somit kann man erwarten, daß es bei der Kommunikation einige Parallelitäten zwischen Interview und Unterricht gibt. Außerdem ist ein Teilziel des Unterrichts, den Schülern die naturwissenschaftliche Fachsprache näherzubringen. Dafür ist nicht nur eine gute Kenntnis der Fachsprache auf Seiten des Lehrers notwendig, sondern auch das Wissen, daß Schüler Fachwörter auf eine unübliche, aber dennoch oft logische Art verwenden. Dadurch kann der Lehrer den Schülern nicht nur klarere Definitionen der Begriffe anbieten, vielmehr kann er durch die Kenntnis möglicher Kommunikationsprobleme seine Schüler auch besser verstehen. Allein das Wissen, daß man einen Schülerkommentar nicht immer so interpretieren kann, als be-

nutzte der Schüler eine korrekte Fachsprache, ist zwar hilfreich aber nicht ausreichend. Es ist besser, wenn man für bestimmte Fachwörter weiß, welche alternativen Bedeutungsinhalte ihnen aus logischen Gründen zugeordnet werden können.

Die Interviews haben gezeigt, daß bestimmte Begriffsnamen von den Schülern nicht immer auf die unter Naturwissenschaftlern übliche Art benutzt werden. Außerdem verwenden einzelne Schüler nebeneinander unterschiedliche Definitionen für einen Begriffsnamen. In einigen Fällen läßt sich genau beschreiben, wie die Schüler Begriffsnamen benutzen. Es zeigt sich, daß manche Definitionen der Schüler sehr logisch sind. An einigen Stellen deutet sich an, wie sich die falschen Definitionen aus dem Unterricht und aus Schulbuchtexten ergeben. Es zeigt sich, daß andere Forscher mit anderen Methoden zu ähnlichen Ergebnissen gelangen (Kap. 5.6.4).

Im folgenden wird die in den Interviews beobachtete Benutzung der Begriffe 'Minuspol', 'Pluspol' (Kap. 5.6.4.1), 'Anode', 'Kathode' (Kap. 5.6.4.2) und 'Elektrolyse' (Kap. 5.6.4.3) beschrieben.

Diese Ergebnisse werden in Kapitel 5.6.4 diskutiert. Dazu ist es zunächst notwendig, über die naturwissenschaftliche Benutzung dieser Begriffe zu reflektieren, bevor die Verwendung der Begriffe durch die Schüler betrachtet wird. Die Diskussion mündet in konkrete Vorschläge für die Benutzung der Begriffe im Chemieunterricht an Schulen.

5.6.1 'Pluspol', 'Minuspol' und 'positiv', 'negativ'

Bei der Überlegung, ob ein Teil der Zelle positiv oder negativ ist, kann sowohl ausgehend vom Elektronenfluß als auch ausgehend von dem 'Inhalt' des entsprechenden Teiles argumentiert werden. Die Schüler S2, S9 und S10 beziehen 'positiv' und 'negativ' dabei auf die Elektroden oder die Lösungen als Ganzes.

Einige Schüler benutzten nebeneinander gegensätzliche Definitionen. Dies scheint auf den ersten Blick widersprüchlich zu sein, ist es aber nicht, wie sich in Kap. 5.6.4 zeigen wird.

i) Argumentation ausgehend vom Elektronenfluß

Häufig wird davon ausgegangen, daß der Pluspol Elektronen aufnimmt und der Minuspol Elektronen abgibt (S1⁶⁵, S2, S3, S4, S6, S7, S8, S9). Das wird damit begründet, daß gleichnamige Ladungen sich abstoßen und ungleichnamige Ladungen sich anziehen. Der Minuspol gibt Elektronen ab, weil er negativ ist und der Pluspol nimmt Elektronen auf, weil er positiv ist (S1, S4, S6, S7, S8).

S9 sagt, daß der Minuspol Elektronen abgibt, weil er zu viele hat und der Pluspol sie aufnimmt, weil er zu wenig hat.

Entsprechend fließen Elektronen vom Minuspol zum Pluspol (S2, S3, S4, S6, S7, S8, S9).

[S4:] Minuspol, da kommen im Prinzip auch Elektronen eigentlich her. [...] Und am Pluspol da kommen dann hinterher wieder [...] die Elektronen zusammen. Die werden dann von diesem Pluspol halt wieder angezogen. [...] Also die Elektronen gehen vom Minus- zum Pluspol. [1:11]

Eine andere Annahme ist, daß die positive Elektrode Elektronen abgibt und die negative Elektrode Elektronen aufnimmt (S2, S4, S6, S10).

[S2:] Pluspol ist der, Pol, von dem Elektronen weg wandern. Und die wandern zu dem [...] Minuspol. [0:58 – Skizze 1]

Dabei ist der Pluspol positiv, weil er Elektronen abgibt und der Minuspol negativ, weil er Elektronen aufnimmt (S2, S4, S6, S10).

[S4:] Elektronen kommen zum Zink und dieses Zink [...] oder diese Zinkelektrode wird halt negativ geladen. [0:23 – Skizze 2]

Für S10 fließen Elektronen im äußeren Stromkreis vom Pluspol zum Minuspol. Er zeichnet die Richtung des Elektronenflusses entsprechend in beide Skizzen ein.

S2 sagt, daß die Feldlinien von Plus nach Minus gehen und somit auch die Elektronen vom Pluspol zum Minuspol wandern.

⁶⁵ S1 spricht hier nicht von Elektronen, sondern von "negativen Teilchen" und bezieht diese Betrachtungsweise nur auf den inneren Stromkreis.

[S2:] Die Feldlinien, also die Elektronen wandern ja immer von Plus nach Minus.
[0:57 – Skizze 1]

S4 und S6 gehen davon aus, daß Elektronen im äußeren Stromkreis vom Minuspol zum Pluspol wandern. Hier wird ein *Perspektivenwechsel* zwischen dem inneren und äußeren Stromkreis vollzogen (s. Kap. 5.7.1.3).

ii) **Argumentation ausgehend vom 'Inhalt' des betreffenden Teiles der Zelle**

Einige Schüler gehen vom 'Inhalt' des betreffenden Teils der Zelle aus. Eine Elektrode bzw. eine Lösung ist dann positiv, wenn in ihr mehr positive als negative Teilchen enthalten sind (S2, S7, S10).

[S7:] Die Lösung [...] wird ja dann auf jeden Fall negativ werden, weil immer weniger Zn^{2+} Ionen drin wären. ... [...] dann hätten wir praktisch SO_4^- Ionen in der Lösung. [0:54 – Skizze 2]

Für S3 und S9 entspricht eine positive Ladung einem Elektronenmangel und eine negative Ladung einem Elektronenüberschuß.

[S9:] Die Zinkelektrode ist .. negativ geladen – hat also zu viele Elektronen und gibt die ab. Die Kupferelektrode ist positiv geladen, hat zu wenig Elektronen und nimmt die auf. [0:57 – Skizze 1]

S3 und S6 geben an, daß die positive Elektrode aufgrund einer Schicht von positiven Ionen, die sich in der Lösung um die Elektrode herum befinden, positiv ist (s. Kap. 5.7.1.3). S4 geht von einer positiven Ionenschicht aus, als es darum geht, zu erklären, warum sich in der Lösung negative Teilchen auf die negative Elektrode zu bewegen (s. Kap. 5.4.3).

5.6.1.1 Beschriftung der Elektrolysezelle

Die konsequente Anwendung der oben beschriebenen Definitionen von 'Pluspol' und 'Minuspol' hat zur Folge, daß einige Schüler davon ausgehen, daß bei der Elektrolysezelle der Pluspol der Spannungsquelle mit der negativen Elektrode und der Minuspol der Quelle mit der positiven Elektrode verbunden sind (Abbildung 10). Das folgt aus den Annahmen, daß Elektronen vom Minuspol zum Pluspol fließen (S4, S7) oder daß der Minuspol Elektronen abgibt und der Pluspol Elektronen aufnimmt (S7, S9) bzw. daraus, daß der Pluspol Elektronen abgibt und der Minuspol Elektronen aufnimmt (S10).

[I:] Wenn du im Labor so einen Aufbau zusammenstöpseln willst. Dann hast du die Quelle, daß ist ja so ein Kasten und da sind Anschlüsse dran, da steht auch Plus und Minus drauf. .. Kannst du das an die Quelle auch noch mal dran schreiben?

[S10] ... [lacht] Das ist eine Herausforderung. .. Ich sage es ja, Physik ist nicht so ganz die Sache. mh, na ja, probieren wir es. Ja. [...], dann muß ich schon mal anfangen, hier zu gestehen, daß ich mit Plus und Minus bei [...] Quellen eigentlich [...] nicht viel anfangen könnte. ... Aber, weiß ich nicht. Da würde ich mir jetzt mal denken, daß ... ja, Plus die Seite ist, wo die Elektronen raus kommen. Also wäre das in dem Fall hier ... [Beschriftung am linken Anschluß der Spannungsquelle: "+"] .. und Minus die Seite, wo die Elektronen rein kommen. [Beschriftung am linken Anschluß der Spannungsquelle: "-"] [1:09 – Skizze 2]

S9 beschreibt einen Laden-Entladen-Zyklus (s. Kap. 5.1.3). Er geht davon aus, daß beim Ladevorgang (Skizze 2) die Elektrode, die mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbunden ist, positiv ist. Nach dem Aufladen ist diese Elektrode dann negativ (s. Kap. 5.7.2). Er beschriftet die Elektroden in Skizze 2 mit der Ladung, die sie nach dem Aufladen, also im geladenen Zustand, tragen.

[S9:] Die Zinkhalbzelle dadurch, daß sie Elektronen aufnimmt, wird negativ, ist aber in dem Moment, wo die Elektronen ihm zugefügt werden positiv. Weil [...] nur eine positive Halbzelle kann ja Elektronen aufnehmen [...] Und die Kupferelektrode ist erst mal [...] negativ, weil die Elektronen von da kommen. Ja, auf jeden Fall genau das Gegenteil. [0:50 – Skizze 2]

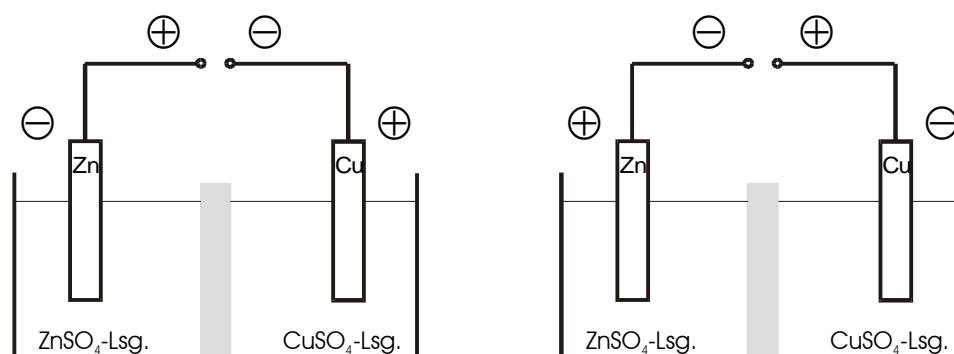


Abbildung 10: Beschriftung der Elektrolysezelle mit Plus und Minus (links:S4, S10 / rechts S7, S9⁶⁶)

⁶⁶ Das geht bei S9 nur aus den Beschreibungen des Schülers hervor, er zeichnet es nicht so in die Skizze 2 ein.

5.6.2 'Anode' und 'Kathode'

Die Begriffsnamen 'Anode' und 'Kathode' werden von den Schülern unterschiedlich benutzt. Einige Definitionen stellen eine direkte Verknüpfung mit den Begriffen 'Pluspol' und 'Minuspol' dar, andere gehen von Ionenbewegungen in den Lösungen oder von Elektrodenprozessen aus. Einzelne Schüler benutzen gleichzeitig unterschiedliche Definitionen des Begriffspaares. Das wird in Kap. 5.6.2.1 (S7, S8 und S9) bzw. in Kap. 5.7.2 (S3) beschrieben.

i) Direkte Verknüpfung von 'Anode', 'Kathode' mit 'Pluspol', 'Minuspol'

S1, S4, S6 und S9 gehen davon aus, daß die Kathode immer der Minuspol und die Anode immer der Pluspol ist.

S1 sagt, daß es "Bereiche" gibt, in denen die Verknüpfung der Begriffspaare 'Anode', 'Kathode' und 'Minuspol', 'Pluspol' andersherum ist. Er ist sich nicht sicher, ob er sich für die richtige Verknüpfung entschieden hat und stellt fest, daß es auch andersherum sein könnte. Sicher ist er sich hingegen, daß die Verknüpfung für beide Zelltypen gleich sein muß, da es sich um sehr ähnliche Vorgänge handelt.

[S1:] Ich hab das auch so gelernt, daß die Kathode der Minuspol und die Anode der Pluspol ist. Und letztes Halbjahr in der Elektrochemie haben wir da so Einschränkungen gemacht, daß das nicht immer der Fall ist.

[I:] **Du weißt aber nicht mehr, wann das eingeschränkt werden muß?**

[S1:] Nein, es kann auch sein, daß das hier der Fall ist. Und das umgekehrt heißt, der Minuspol Anode und Pluspol Kathode.

[I:] **Hier ist – für meine Aufnahme – die erste Zeichnung.**

[S1:] Ja. Ja, das gilt dann auch für die zweite. Weil, daß ist ja fast der gleiche Vorgang. Strom und Lampe das ... [0:58]

Für S8 ist die Kathode immer der Pluspol und die Anode immer der Minuspol.

[S8:] Die Anode ist eben halt der Minuspol und die Kathode der Pluspol. .. [0:13 – Skizze 1]

[S8:] Anode ist ja auch am Minuspol. [1:03 – Skizze 2]

S7 sagt, daß die Begriffspaare in der Physik direkt verknüpft sind (Anode immer Pluspol, Kathode immer Minuspol), behauptet dann, daß es in der Chemie keinen festen Zusammenhang zwischen den beiden Begriffspaaren gibt und gelangt später zu dem Schluß, daß die Kathode immer der Pluspol und die Anode immer der Minuspol ist (s. Kap. 5.6.2.1).

S3 unterscheidet zwischen Elektrolyse und "Galvanolyse". Bei der Elektrolyse ist die Anode der Pluspol und die Kathode der Minuspol. Die "Galvanolyse" stellt die Umkehrung der Elektrolyse dar und daher ist dort die Anode der Minuspol und die Kathode der Pluspol. S3 kehrt die Verknüpfung der Begriffspaare beim Übergang von einem Zelltypen zum anderen um und gelangt so zu einer richtigen Aussage.

[S3:] Da ja normalerweise [Elektrolyse] die Anode als positiv und die Kathode als negativ gekennzeichnet wird. [...] Das wollte ich im Prinzip ansprechen vorhin, daß man diese Definition umkehrt [Galvanolyse]. [0:44 – Skizze 1 & 2]

[S3:] Bei der Galvanolyse haben wir die Kathode so beschrieben, daß die Kathode nicht mehr der Minuspol ist, sondern der Pluspol. [0:37 – Skizze 1 & 2]

Er geht jedoch fälschlicherweise davon aus, daß an einem Minuspol immer eine Reduktion und an einem Pluspol immer eine Oxidation stattfindet. Daraus leitet er die Beschriftung der Zellen mit Plus und Minus ab. Seine Beschriftung mit 'Anode' und 'Kathode' folgt aus den oben beschriebenen Verknüpfungen der Begriffspaare. Die Elektrolysezelle wird von ihm demnach richtig und die galvanischen Zelle falsch beschriftet (s. Anhang: S3 – Skizze 1 & 2).

ii) Definition von 'Anode', 'Kathode' über Ionenbewegungen

Die Schüler S1 und S10 gehen davon aus, daß die Anode die Elektrode ist, auf die sich Anionen (negative Ionen) zu bewegen. Die Kathode ist die Elektrode, zu der Kationen (positive Ionen) wandern. Da gleiche Ladungen sich abstoßen und ungleiche Ladungen sich anziehen, muß aus Sicht der Schüler die Anode immer der Pluspol und die Kathode immer der Minuspol sein. So wird von ihnen die direkte Verknüpfung der Begriffspaare 'Anode', 'Kathode' und 'Pluspol', 'Minuspol' begründet.

[S10:] Ja, die Anode ist eben der Pluspol. Und zwar, weil sich da [...] die Anionen sammeln, die negativ geladenen Teilchen also. Und dann muß es der Pluspol sein. Die Kathode ist eben Minuspol. [1:14]

iii) Definition von 'Anode', 'Kathode' über Elektrodenprozesse

S4, S7, S8⁶⁷ und S9 sagen, daß an der Anode immer die Oxidation und an der Kathode immer die Reduktion stattfindet. Jedoch verwendet keiner der Schüler nur diese Definition. S4, S7⁶⁸ und S9 gehen außerdem davon aus, daß die Kathode immer der Minuspol und die Anode immer der Pluspol ist, S8 geht davon aus, daß die Anode immer der Minuspol und die Kathode immer der Pluspol ist.

S9 behauptet, daß die Verknüpfung von 'Anode', 'Kathode' mit 'Oxidation', 'Reduktion' in der Physik andersherum ist als in der Chemie.

S3 geht davon aus, daß an der Anode immer eine Elektronenaufnahme und an der Kathode immer eine Elektronenabgabe stattfindet. Dabei beziehen sich die Begriffe 'Abgabe' und 'Aufnahme' auf die Elektrode und nicht auf die Teilchen. Als Austauschpartner wird mal der innere und mal der äußere Stromkreis angesehen (s. Kap. 5.6.4).

5.6.2.1 Entwicklung im Gespräch

S7 sagt, daß in der Physik die Anode der Pluspol und die Kathode der Minuspol ist und daß es in der Chemie keinen festen Zusammenhang zwischen den Begriffspaaren gibt.

Für ihn findet an der Anode immer eine Oxidation (Elektronenabgabe⁶⁹) und an der Kathode immer eine Reduktion (Elektronenaufnahme⁶⁹) statt. Bei der weiteren Diskussion der beiden Zellen stellt er jedoch fest, daß die Elektronen in seiner Beschreibung immer durch den äußeren Stromkreis von der Anode zur Kathode fließen. Da seiner Meinung nach Elektronen immer vom Minuspol zum Pluspol fließen, ergibt sich auch für die Chemie eine direkte Verknüpfung

⁶⁷ Diese Annahme wird im Verlauf des Interviews von S8 aufgegeben (s. Kap. 5.6.2.1)

⁶⁸ s. Kap. 5.6.2.1

⁶⁹ Die Elektronenaufnahme bzw. -abgabe wird auf die Teilchen bezogen, die reduziert bzw. oxidiert werden.

zwischen den beiden Begriffspaaren. Die Anode ist für beide Zelltypen der Minuspol und die Kathode der Pluspol.

[S7:] Also, vorher haben wir das immer so gesagt, daß die Anode der Pluspol und die Kathode der Minuspol ist. Einfach so. Von der Physik glaube ich. Und jetzt hier [...] kann man das gar nicht mehr festlegen. Was Plus- und [...] Minuspol ist. Das muß man gucken, wie [...], in welche Richtung der Stromkreislauf eben läuft. [0:36]

[S7:] Das muß ja eigentlich doch immer Kathode gleich Pluspol [sein]. Weil, wenn die Elektronen immer in die Richtung des Pluspols fließen und die Kathode immer Elektronen aufnimmt, ja, dann muß das ja zusammen passen. Auf jeden Fall.

Nur [...] hier in den beiden Skizzen sind die dann eben vertauscht. Also Kathode und Anode sind vertauscht. Aber nicht Plus- und Minuspol mit der Kathode und der Anode. [0:39 – Skizze 1 & 2]

S8 benutzt zwei unterschiedliche Definitionen für 'Anode' und 'Kathode'. Zum einen ist die Anode für ihn immer der Minuspol und die Kathode immer der Pluspol, und zum anderen findet an der Anode immer eine Oxidation (Elektronenabgabe⁶⁹) und an der Kathode immer eine Reduktion (Elektronenaufnahme⁶⁹) statt.

Außerdem geht er davon aus, daß bei der galvanischen Zelle am Pluspol eine Reduktion und am Minuspol eine Oxidation stattfindet. Da es sich bei der Elektrolysezelle um die Umkehrung der galvanischen Zelle handelt, muß dort am Pluspol eine Oxidation und am Minuspol eine Reduktion stattfinden (s. Kap. 5.2.3).

Diese Annahmen können gemeinsam nicht widerspruchsfrei auf beide Zelltypen angewendet werden. So müßte nach Aussagen des Schülers am Minuspol der Elektrolysezelle eine Reduktion stattfinden. Damit wäre dieser Pol nach der zweiten Definition von 'Anode' und 'Kathode' die Kathode. Nach der ersten Definition des Begriffspaares ist die Kathode aber der Pluspol. Der Schüler bemerkt selbst diesen Widerspruch und gibt die Verknüpfung von 'Anode', 'Kathode' mit 'Oxidation', 'Reduktion' auf. Für ihn findet fortan bei der Elektrolyse an der Anode die Reduktion und an der Kathode die Oxidation statt.

[I:] **Ganz am Anfang hattest du geschrieben: Anode Oxidation.**

[S8:] Ja, das ist umgekehrt.

[I:] **Und jetzt schreibst du es anders rum.**

[S8:] Ja, ich denke mal [...] durch den .. Stromkreislauf wird das verschoben. [1:03 – Skizze 2]

S9 verknüpft den Begriff 'Kathode' mit den Begriffen 'Reduktion' und 'Minuspole', den Begriff 'Anode' mit den Begriffen 'Oxidation' und 'Pluspol'. Dies führt zu widersprüchlichen Aussagen. Der Schüler begründet die Bezeichnung der Elektroden mit 'Anode' und 'Kathode' entweder über die Ladung der Elektrode oder über die Reaktionstypen, ohne beide Möglichkeiten miteinander zu vergleichen. Er verwendet die Begriffsnamen 'Oxidation' und 'Reduktion' unterschiedlich⁷⁰. Die Elektroden der Elektrolysezelle beschriftet er nicht mit den Ladungen, die sie beim Ladevorgang haben, sondern mit den Ladungen, die er ihnen im geladenen Zustand zuschreibt (s. Kap.5.6.1.1). In Skizze 1 korrigiert er seine Beschriftung der Elektroden auf eine Art, die diese sehr unübersichtlich macht. Daher bemerkt er die Widersprüchlichkeit seiner Angaben nicht.

5.6.3 'Elektrolyse'

Einige Schüler geben Kriterien an, mit denen sie entscheiden, ob es sich bei einer elektrochemischen Zelle um eine Elektrolysezelle handelt.

Kritische Attribute für den Begriff 'Elektrolyse' sind demnach:

Existenz einer Quelle:

Der Aufbau enthält eine Spannungsquelle. Es wird Energie an die Zelle abgegeben (S4).

An die Zelle wird ein "Gleichstrom angelegt" (S6).

Bei einer Elektrolyse "fügt man Strom hinzu", damit die Reaktionen gegen ihre Potentiale laufen (S10).

Die Elektrolysezelle enthält kein Diaphragma

Im Unterricht wurde für die Elektrolyse ein Aufbau ohne Diaphragma verwendet⁷¹ (S7).

⁷⁰ Für ihn ist eine 'Oxidation' manchmal eine Elektronenaufnahme und manchmal eine Elektronenabgabe. Er bemerkt zwar von selbst, daß er die Begriffe unterschiedlich benutzt, aber es macht den Argumentationsverlauf für ihn unübersichtlich.

⁷¹ S7 bezeichnet Skizze 2 dennoch als Elektrolyse.

Bei einer Elektrolyse tauchen beide Elektroden in dieselbe Lösung ein. Sie sind nicht durch eine Membran voneinander getrennt (S10).

Produkte der Elektrolyse

Bei einer Elektrolyse entsteht Wasserstoff und Sauerstoff (S6).

Bei einer Elektrolyse sind Elektrodenmaterial und Reaktionsprodukte unterschiedlich (S10).

[S10:] Weil bei Elektrolyse,... da ist glaube ich das Ganze schon mal in einem Bottich. Also da sind beide Elektroden im selben Medium drin. Und das ist nicht irgendwie getrennt durch eine Membran [...] .. Aber es erinnert eben daran, weil man Strom zufügt, damit sich.. [...] ein Feststoff bildet. Und [...] hier [...] [Skizze 1] bildet sich auch ein Feststoff. [...] Aber da muß man keinen Strom hinzufügen. Ja und jetzt weiß ich es auch. Bei [der] Elektrolyse ist es außerdem so, [...] daß die Elektroden [...] aus anderen Stoffen bestehen praktisch als [...] was dazukommt. Hier ist es eine Zinkelektrode und eine Zinklösung und daraus kommt Zink an die Elektrode. Und bei Elektrolyse, [Skizze 2 / er streicht die Beschriftung oben links durch: "Elektrolyse"] da ist es beispielsweise so, daß [...] Kohlenelektrode oder so, daß sich da zum Beispiel Chlorgas bildet – oder so. [0:55 – Skizze 1 & 2]

5.6.4 Diskussion

Ein klares Bild von der Verwendung von Begriffen in der Wissenschaftssprache ist eine Voraussetzung für die Bewertung der Benutzung wissenschaftlicher Begriffe durch Schüler. Um herauszufinden, wie die Gemeinschaft der Wissenschaftler Begriffe benutzt, sollen anerkannte Lehrbücher untersucht werden. Die Funktion dieser Bücher ist es, nachwachsende Generationen von Wissenschaftlern in das aktuelle Paradigma und in die Wissenschaftssprache einzuführen (s. Kap. 2.1).

Die Lehrbücher sind darauf ausgerichtet, das Vokabular und die Syntax einer aktuellen wissenschaftlichen Sprache zu vermitteln. Gemeinverständliche Darstellungen versuchen, die gleichen Anwendungen in einer alltäglichen Ausdrucksweise zu beschreiben. (KUHN, 1967, Seite 147f)

Aus diesem Grund erscheint eine Untersuchung von Lehrbüchern sinnvoller als die Untersuchung historischer Quellen, wenn man am aktuellen Sprachgebrauch der Wissenschaftler interessiert ist. Die historischen Quellen enthalten Vorschläge einzelner Wissenschaftler, die Lehrbücher den Konsens der Gemeinschaft, über den der Nachwuchs informiert werden soll. Zum Studium der Wissenschaftsgeschichte sind die Lehrbücher ungeeignet.

Zur Erfüllung ihrer Funktion brauchen sie keine authentische Information über Art und Weise zu liefern, in der diese Grundlagen zuerst erkannt und dann von der Fachwissenschaft aufgenommen wurden. Zumindest im Falle der Lehrbücher gibt es sogar gute Gründe, warum sie in diesen Dingen oft systematisch in die Irre führen.

(KUHN, 1967, Seite 148)

Eine weitere interessante Quelle für die Untersuchung der aktuellen Wissenschaftssprache stellen Versuche der wissenschaftlichen Gemeinschaft dar, ihre Sprache zu normen, wie sie beispielsweise von der *International union of pure and applied Chemistry* (IUPAC) unternommen werden⁷². Ein Beispiel dafür, wie sich der aktuelle Sprachgebrauch von dem ursprünglichen unterscheidet, stellt der Begriff 'Elektrode' dar. Dies wird in Kap. 5.6.4.1 beschrieben.

Neben der Analyse von Lehrbüchern werden hier an einigen Stellen auch historische Quellen verwendet, wenn es beispielsweise darum geht, zu verdeutlichen, wie ein Begriffsname zustande gekommen ist. Und wie sich seine ursprüngliche Bedeutung von der heutigen unterscheidet.

5.6.4.1 'Positiv'/'Negativ', 'Pluspol'/'Minuspol'

i) Die wissenschaftliche Definition der Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol'

Der Begriff 'Pol' spielt eine wichtige Rolle in der Physik und die Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' sind aus der Elektrochemie nicht wegzudenken. Daher erscheint es erstaunlich, daß man in vielen Lehrbüchern der Physik und der Chemie keine klaren Definitionen dieser Begriffe findet.

Der Begriffsname 'Pol' stammt vom lateinischen 'polus' (Drehpunkt, Achse, Erdpol) bzw. vom griechischen 'polos' ('pelein' – in Bewegung sein) ab.

Das Register eines weit verbreiteten Lehrbuches der Experimentalphysik (BERGMAN & SCHAEFFER, 1971) verweist unter dem Begriff "Pol, elektrischer" auf die folgende Textstelle:

⁷² Dabei muß man beachten, daß die Vorschläge der IUPAC nicht immer von der wissenschaftlichen Gemeinschaft angenommen werden.

[...] ist sowohl im Daniellschen wie im Grove-Bunsenschen Element das Zn negativ, dagegen Cu bzw. Pt (oder C) positiv; diese Enden des Elementes pflegt man seine **Pole** zu nennen.

(BERGMANN & SCHAEFFER, 1971, Seite 83)

Die Tatsache, daß der Begriff 'elektrischer Pol' hier über galvanische Zellen eingeführt wird, ist nicht erstaunlich, wenn man bedenkt, daß es die Erfindung der VOLTA'SCHEN Säule war, die es den Physikern erstmals ermöglichte, systematisch mit elektrischem Strom zu experimentieren (BOTSCH, 1993). Das galvanische Element war in diesem Sinne eine experimentelle Voraussetzung für die Entwicklung der Elektrodynamik.

Es gibt idealisierte Ladungskonstellationen, bei denen einfach festzulegen ist, wo der Minuspol und wo der Pluspol ist. Eine solche Konstellation stellt der elektrische Dipol dar. Dabei handelt es sich um zwei Punktladungen $+q$, $-q$ die den Abstand d voneinander haben. Sie werden nur dann als Dipol bezeichnet, wenn d klein gegen den Abstand ist, den der Betrachter von diesem System hat (FEYNMAN, 1991). Hier ist die Punktladung $+q$ der Pluspol und die Punktladung $-q$ der Minuspol.

Diese Festlegung fällt aber bei realen, makroskopischen Systemen schwerer. In der Literatur wird häufig einfach auf Klemmen und Anschlüsse an Spannungsquellen verwiesen.

Die einfachste stromführende Anordnung ist ein Stromkreis. Er besteht aus einer Stromquelle, deren *Klemmen* oder Pole über Leitungsdrähte mit einem Verbraucher verbunden sind.

(BRANDT & DAHMEN, 1986, Seite 154)

Pol:

- Bez. für die beiden Anschlußklemmen (Anschlußpunkte) einer Spannungs- oder Stromquelle, auch von sonstigen elektrischen Bau- und Schaltelementen.
- die positive bzw. negative Ladung eines elektrischen Dipols.

(KUNSMÜLLER, 1970, Seite 2006)

Diese Definition reicht aber für die Behandlung von elektrochemischen Zellen nicht aus.

Im BROCKHAUS DER NATURWISSENSCHAFT UND TECHNIK wird der Begriff 'Pol' über Ein- und Austrittsstellen von Feldern folgendermaßen definiert:

Pol

[...]

Physik und Technik: das Ende eines im allg. langgestreckten Körpers, das zugleich Ein- und Austrittsstelle eines elektrischen oder magnetischen Feldes ist. Der negative Pol – bei einem Leiter – ist Eintrittsstelle und Sitz der Senke, der positive Pol Austrittsstelle und Sitz der Quelle eines elektrischen Feldes.

Die Kraftfeldlinien eines Magnetfeldes treten aus dem Nordpol eines ferromagnetischen Körpers aus, und sie treten in den Südpol ein.

(BROCKHAUS DER NATURW. UND TECHNIK, 1971, Seite 575)

Ein Vergleich mit magnetischen Polen zeigt, daß die Definition über Ein- und Austrittsstellen alleine nicht ausreichend ist.

Das Register des bereits zuvor erwähnten Lehrbuchs der Experimentalphysik (BERGMAN & SCHAEFFER, 1971) verweist unter dem Begriff "Pol, magnetischer" auf die folgende Textstelle:

Denken wir uns [...] einen gegen seine Dicke sehr langen Stahlstab magnetisiert und tauchen ihn in Eisenfeilicht, so beobachten wir nach dem Zurückziehen aus dem Eisenpulver, daß dieses in größeren Mengen an zwei bestimmten Stellen des Stabes hängen bleibt [...]. Diese Stellen liegen ungefähr um $1/12$ der Stablänge von den Enden entfernt und werden **Pole** genannt. Die Mitte des Stabes, wo keine Anziehung stattfindet, heißt neutrale oder indifferente Zone des Magneten, die Verbindungslinie seiner Pole magnetische Achse.

(BERGMANN & SCHAEFFER, 1971, Seite 90)

Die Pole eines Stabmagneten sind etwa $1/12$ der Stablänge von den Enden des Stabmagneten entfernt. Wenn man die Feldlinien eines Stabmagneten mit Eisenfeilspänen sichtbar macht, so wird man feststellen, daß nicht nur an den Polen Feldlinien aus dem Magneten heraus- bzw. in ihn hineintreten. Die Pole sind die Stellen, an denen das magnetische Feld beim Aus- bzw. Eintritt am stärksten ist. Folglich sind die Feldlinien dort am dichtesten.

Elektrische Felder unterscheiden sich in wesentlichen Punkten von magnetischen Feldern. Ein Vergleich zwischen elektrischen und magnetischen Feldern findet sich im *Berkeley Physik Kurs 2* (PURCELL, 1989). Dort wird der

wohl wichtigste Unterschied zwischen elektrischen und magnetischen Feldern diskutiert.

Das Magnetfeld außerhalb eines magnetischen Stabes, z. B. einer Kompaßnadel, sieht dem elektrischen Feld außerhalb eines elektrisch polarisierten Stabes sehr ähnlich; ein solcher Stab hat an einem Ende einen Überschuß an positiver und am anderen Ende einen Überschuß an negativer Ladung [...]. Es ist denkbar, daß das magnetische Feld Quellen besitzt, die mit ihm auf gleiche Weise verbunden sind wie die elektrischen Ladungen mit dem elektrischen Feld. Am Nordpol der Kompaßnadel wäre dann eine Art "magnetischer Ladung" und am Südpol die entgegengesetzte Art im Überschuß vorhanden. Wir könnten die Ladung am Nordpol positiv und die am Südpol negativ nennen und wie im Falle des elektrischen Feldes festsetzen, daß die Richtung des Magnetfeldes von den "positiven zu den negativen Ladungen" verläuft. Historisch gesehen wurde auf diese Weise die Richtungskonvention für das Magnetfeld begründet; was wir als "magnetische Ladung" bezeichnet haben, heißt allgemein *magnetische Polstärke*.

So weit klingt alles ganz vernünftig. [...]

Leider liegen die Dinge aber nicht so. Aus irgendeinem Grund hat die Natur von dieser Möglichkeit keinen Gebrauch gemacht. Die Welt um uns tritt völlig unsymmetrisch in Erscheinung: Wir finden *keine* wie auch immer gearteten *magnetischen Ladungen*. [...] Würde ein solcher *magnetischer Monopol* tatsächlich existieren, hätten wir mehrere Nachweismöglichkeiten.

(PURCELL, 1989, Seite 261)

Wenn es darum geht, festzulegen, wo sich die Pole eines makroskopischen Systems befinden, scheint der Vergleich zwischen elektrischen und magnetischen Feldern statthaft. Neben der bereits oben angesprochenen Definition über den Feldbegriff wird auch eine Definition über Ladungsdichten verwendet. Im *Berkeley Physik Kurs 2* war von einem Überschuß an Ladungen die Rede. So eine Definition ist auch im *Taschenbuch der Physik* (KUCHLING, 1988) zu finden:

Am **Minuspol** besteht ein Elektronenüberschuß, am **Pluspol** ein Elektronenmangel. Beide Zustände werden durch Vorgänge im Inneren der Spannungsquelle erzeugt und aufrechterhalten. Die Elektronen fließen *außerhalb* der Spannungsquelle vom Elektronenüberschuß zum -mangel, also vom Minus- zum Pluspol.

(KUCHLING, 1988, Seite 396)

Neben der Definition über Elektronendichten wird hier noch eine Definition über den Elektronenfluß beschrieben. Diese erfährt aber eine Einschränkung auf "*außerhalb* der Spannungsquelle" (KUCHLING, 1988, Seite 396). Das deutet

darauf hin, daß diese Definition für die Elektrochemie ungeeignet ist, da es sich bei den Spannungsquellen oft um galvanische Zellen handelt. Daß eine eindeutige Definition über den Strombegriff nicht möglich ist, zeigt sich auch in den Interviews und wird später diskutiert. Die Tatsache, daß auch dann, wenn kein Strom fließt, ein 'Pluspol' und ein 'Minuspole' vorhanden sein können, ist ein weiterer Grund für die Unzulänglichkeit einer solchen Definition.

Aus den Lehrbüchern der Physik lassen sich folglich zwei Definitionen für den Begriff 'Pol' entnehmen:

1. **'Pole'** sind die Stellen der Grenzfläche eines Körpers, an denen die Feldlinien am dichtesten sind. Am **'Pluspol'** treten die Feldlinien aus dem Körper heraus, am **'Minuspole'** treten sie in den Körper ein (Definition über das elektrische Feld).
2. Der **'Pluspol'** trägt einen Überschuß an positiven Ladungen, der **'Minuspole'** trägt einen Überschuß an negativen Ladungen (Definition über die Ladungsverteilung).

Die erste Definition ist allgemeiner gültig als die zweite. Es besteht jedoch kein prinzipieller Widerspruch zwischen den Definitionen.

Stellungnahme 16: Pole in der Physik

In der Elektrochemie werden zumeist die Elektroden als Ganzes mit 'Minuspole' oder 'Pluspol' bezeichnet. Es muß zunächst geklärt werden, was Naturwissenschaftler unter dem Begriff 'Elektrode' verstehen.

FARADAY prägte den Begriff 'Elektrode', da der bis dahin übliche Begriff 'Pol' aus Theorien entstammte, die mit seiner Theorie im Widerspruch standen.

Die Theorie, welche ich für den wahren Ausdruck der Thatsachen elektro-chemischer Zersetzung halte [...] steht in solchem Widerspruch mit den seither aufgestellten Theorien, dass ich die grössten Schwierigkeiten finde, Resultate meiner Einsicht nach richtig anzugeben, so lange ich mich auf den Gebrauch der Kunstausdrücke beschränke, die mit einer gewissen hergebrachten Bedeutung üblich sind. Von dieser Art ist der Name Pol, mit den Beiworten positiv und negativ und den damit verknüpften Ideen von Anziehung und Abstossung. Gewöhnlich heisst es: der positive Pol ziehe den Sauerstoff, die Säure u. s. w. an, oder vorsichtiger, er bestimme deren Entwicklung auf seiner Oberfläche, und der negative Pol wirke in gleicher Weise auf Wasserstoff, brennbare Körper, Metalle und Basen. Meiner Ansicht gemäss liegt aber die bestimmende Kraft nicht an den Polen, sondern in dem zersetzten Körper; und Sauerstoff und Säuren werden zum negativen Ende eines solchen Körpers gemacht, während Wasserstoff, Metalle u. s. w. am positiven Ende desselben entwickelt werden.

(FARADAY, 1897, §661)

FARADAY definiert die 'Elektrode' als die Fläche, die in Richtung des elektrischen Stroms an den 'Elektrolyten'⁷³ grenzt. Im Gegensatz zu dem Begriff 'Pol' bezieht sich der Begriff 'Elektrode' nicht nur auf Metallflächen.

Die Pole, wie sie gewöhnlich genannt werden, sind bloss die Thore oder Wege, durch welche die Elektrizität zum zersetzten werdenden Körper hinein- und austritt, sind also, wenn sie mit jenem Körper in Berührung stehen, die Grenzen seiner Erstreckung in Richtung des Stroms. Im Allgemeinen wird der Ausdruck von Metallflächen gebraucht, die mit der zersetzten werdenden Substanz in Berührung stehen; ob aber die Physiker ihn ebenso allgemein von den Luft- und Wasserflächen gebrauchen würden, gegen welche ich elektro-chemische Zersetzung bewirkt habe, ist zweifelhaft.

Statt des Namens Pol schlage ich den: Elektrode (ηλεκτρον und οδος, der Weg) vor, und verstehe darunter diejenige Substanz oder vielmehr Fläche, sei sie von Luft, Wasser, Metall oder sonst einem Körper gebildet, die in Richtung des elektrischen Stroms an den zersetzten werdenden Körper grenzt.

(FARADAY, 1897, §662)

Heute wird dieser Begriff anders verwendet. Unter einer 'Elektrode' versteht man im allgemeinen den "Teil eines festen Leiters, der der Zuführung eines elektrischen Stroms in eine Flüssigkeit, ein Gas, ein Vakuum oder auf einen

⁷³ Für Körper, die direkt durch den elektrischen Strom in ihre Elemente zerlegt werden prägt er den Begriff 'Elektrolyt' (FARADAY, 1897, §664).

Festkörper dient" (JAKUBKE & JESCHKEIT, 1987, Seite 311). Das *Römpp Chemielexikon* versteht unter dem Begriff Elektrode eine "Sammelbez. für elektronenleitende Werkstoffe in einem Elektrolyten" (FALBE & REGITZ, 1997, Seite 1112). Diese beiden Definitionen sind miteinander vereinbar. Der Begriff 'elektrochemische Elektrode' wird hingegen unterschiedlich benutzt.

Als **elektrochemische E.** bezeichnet man ein mehrphasiges System, in dem sich zwischen zwei den elektrischen Strom leitenden und elektrisch hintereinandergeschalteten Phasen elektrochemische Gleichgewichte einstellen können. Eine Phase eines solchen Systems besteht aus einem Elektronenleiter (oder einem Defektelektronenleiter), die andere(n) aus Ionenleitern. Gelegentlich wird der Begriff E. auch nur für den Elektronenleiter (oder Defektelektronenleiter) des Systems angewandt.
(JAKUBKE & JESCHKEIT, Seite 312)

Bei den E. im weiteren Sinne handelt es sich um die sog. elektrochem. E., nämlich um Zwei- od. Mehrphasensyst., die ein bestimmtes Potential dadurch annehmen, daß Ladungsträger aus der einen in die andere(n) Phase(n) übergehen. Sie werden auch als Halbzellen bezeichnet;
(FALBE & REGITZ, 1997, Seite 1113)

Ist also in der Elektrochemie von einer 'Elektrode' die Rede, so kann damit ein elektronenleitender Werkstoff in einem Elektrolyten oder eine ganze Halbzelle gemeint sein.

Da die Begriffe 'Minuspole' und 'Pluspole' in der Elektrochemie auf die 'Elektroden' als Ganzes bezogen werden, scheidet deren Definition über Feldlinien aus. Diese Definition ließe sich auf einen Teil einer 'Elektrode' im FARADAY'SCHEN Sinne anwenden, nicht aber auf die heutige Bedeutung des Begriffes. Die Definition der Begriffe 'Minuspole' und 'Pluspole' über Ladungsdichten läßt sich auf 'Elektroden' anwenden, wenn man darunter den elektronenleitenden Werkstoff versteht. Wenn man unter einer Elektrode eine ganze Halbzelle versteht, kann man sie nicht als 'Minuspole' oder 'Pluspole' bezeichnen.

Die Analyse der Wissenschaftssprache ergibt folgendes: Eine sinnvolle Definition der Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' ist für die Elektrochemie in der Schule über Ladungsdichten möglich. Dabei werden die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' auf die Elektroden als Ganzes bezogen. Als 'Elektrode' werden Elektronenleiter bezeichnet, die in den Elektrolyten eintauchen. Der 'Pluspol' ist demnach die Elektrode, in der ein Elektronenmangel herrscht, der 'Minuspol' ist die Elektrode, in der ein Elektronenüberschuß herrscht.

Stellungnahme 17: Pole in der Elektrochemie

Die Relevanz der obigen Diskussion kann mit folgendem Beispiel verdeutlicht werden: GARNETT & TREAGUST beschreiben die falsche Vorstellung, daß eine Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten ausschließlich aus unterschiedlichen Ladungskonzentrationen in diesen Punkten resultiere.

Misconception 3a. A potential difference between two points is solely due to differences in the concentration of charge at the points.

(GARNETT & TREAGUST, 1992a)

Als Beispiel dient der folgende Interviewausschnitt:

Interviewer: What makes a current flow?

Greg: Like a push of electrons at one end an attraction of electrons at the other. Like say with metal ions going into solution there is an excess of electrons on an electrode, and they flow to somewhere where it is attracting them, like where metal ions are coming out of solution where they need the electrons to come out of solution.

Interviewer: Does there have to be an excess of electrons and a positive charge for them to move or . . .

Greg: Well, they can be pushed.

Interviewer: What creates that initial push?

Greg: I can only think of . . . an excess of electrons! (looks perplexed)

(GARNETT & TREAGUST, 1992a)

Das '*Misconception 3a*' ist in sofern tatsächlich falsch, als daß sich ein elektrisches Feld auch durch einen Raum erstreckt, in dem sich keine Ladungen befinden. Die entsprechenden Aussagen der Schüler beziehen sich jedoch auf die Elektroden einer elektrochemischen Zelle. Wenn man die exakte Geometrie der

elektrischen Felder berücksichtigt, so macht es keinen Sinn, eine ganze Elektrode als 'Pol' zu bezeichnen. Die Lehrbuchanalyse hat gezeigt, daß in der Elektrochemie eine Elektrode mit Elektronenmangel als 'Pluspol' und eine Elektrode mit Elektronenüberschuß als 'Minuspole' bezeichnet wird. Aus diesem Blickwinkel ist eine Aussage, wie das "*Misconception 3a*" nicht falsch, wenn sie auf Elektroden bezogen wird. Sie ist höchstens etwas ungenau, aber dieselbe Ungenauigkeit beinhaltet die – unter Chemikern übliche – Gleichsetzung einer Elektrode mit einem elektrischen Pol.

ii) Die Verwendung der Begriffe durch Schüler

Der Begriff 'Pol' wird in den Interviews von allen Schülern auf die Elektrode als Ganzes bezogen. Dabei werden in allen Fällen die Metalle, die in die Lösungen eintauchen, als 'Elektrode' bezeichnet. Der Begriff 'Minuspole' steht bei allen Schülern als Synonym für die negativ geladene Elektrode, der Begriff 'Pluspol' für die positiv geladene Elektrode.

Die meisten Schüler verwenden mehrere unterschiedliche Argumentationsweisen, um zu begründen, warum etwas positiv bzw. negativ geladen ist.

Eine Argumentationsweise geht von dem Inhalt des betreffenden Teils der Zelle aus. Demnach ist eine Elektrode oder eine Lösung positiv geladen, wenn sie mehr positive als negative Teilchen enthält und negativ geladen, wenn sie die negativen Teilchen überwiegen. Das entspricht der zuvor aus Lehrbüchern abgeleiteten Definition der Begriffe 'Minuspole' und 'Pluspol' für die Elektrochemie. In den von MAROHN (1999) untersuchten Schulbüchern (s. Kap. 2.2) werden diese Begriffe unter anderem auf die gleiche Art verwendet.

Eine andere Argumentationsweise geht vom Elektronenfluß in den Zellen aus. Dies wird auch von MAROHN (1999) beschrieben.

Die Schülerkommentare zeigen, daß die Mehrheit der Schüler von den an den Elektroden stattfindenden Elektronenübergängen auf die Ladungen der Elektroden schließt.
(MAROHN, 1999, Seite 128)

Auch in Chemie-Schulbüchern findet sich die Verknüpfung der Begriffe 'Elektronenabgabe' und 'Minuspole', sowie 'Elektronenaufnahme' und 'Pluspol'

(MAROHN, 1999 – s. Kap. 2.2). Es gibt jedoch neben der in den Schulbüchern beschriebenen Verknüpfung noch eine weitere Möglichkeit.

Man kann davon ausgehen, daß der 'Pluspol' Elektronen aufnimmt und der 'Minuspol' Elektronen abgibt. Eine andere Annahme ist, daß der 'Pluspol' Elektronen abgibt und der 'Minuspol' Elektronen aufnimmt. Einige Schüler gehen im Verlaufe des Interviews von beiden Annahmen aus, andere verwenden nur eine der beiden Möglichkeiten. Auf der einen Seite wird die Feststellung, daß der 'Pluspol' Elektronen aufnimmt, damit begründet, daß die positive Ladung des Pols Elektronen anzieht. Auf der anderen Seite wird so argumentiert, daß der 'Pluspol' erst dadurch positiv wird, daß er Elektronen abgibt. Es wird deutlich, daß die Begriffe ihre Eindeutigkeit verlieren, wenn man versucht, sie über den Elektronenfluß und somit über den Strombegriff zu definieren. Das liegt daran, daß im stationären Fall in einem Stromkreis jeder Punkt pro Zeiteinheit genau so viele Elektronen abgeben muß wie er aufnimmt. Eine sinnvolle Definition über den Strombegriff ist auch aus einem anderen Grund nicht möglich: auch im stromlosen Fall gibt es einen Pluspol und einen Minuspol⁷⁴. Die verschiedenen Möglichkeiten, die Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' zu interpretieren, wenn sie über den Strombegriff definiert werden, sind damit noch nicht erschöpft. Dieses Problem ist so komplex, daß ihm in dieser Arbeit ein eigenes Kapitel gewidmet ist (Kap. 5.6.4). Es wird auch von MAROHN (1999) beschrieben.

⁷⁴ Der in der Schule übliche Aufbau, bei dem die Elektroden einer galvanischen Zelle über ein Voltmeter miteinander verbunden sind, stellt im Idealfall einen stromlosen Fall dar. Ein ideales Voltmeter hat einen unendlich großen Widerstand.

Eine eindeutige Definition der Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' über den Strombegriff ist nicht möglich.

Daher sollte es vermieden werden, den Begriff 'Minuspol' immer mit dem Begriff 'Elektronenaufnahme' und den Begriff 'Pluspol' immer mit dem Begriff 'Elektronenabgabe' zu verknüpfen. Ein weiterer Grund dafür ist, daß dies die falsche Vorstellung stärken kann, an einem Pluspol fände immer eine Oxidation statt (s. Stellungnahme 3).

Stellungnahme 18: 'Minuspol' und 'Pluspol' sind nicht mit der Stromrichtung verknüpft

Eine mögliche Ursache dafür, warum – auch in Schulbüchern – die Richtung des Stromflusses mit der Ladung der Elektroden verknüpft wird, kann die in Kap. 5.3.3 diskutierte Verwechslung von Startvorgang und stationärem Zustand sein. Wird ein Zinkblech in eine Zinksulfatlösung getaucht, so entsteht eine Potentialdifferenz zwischen Blech und Lösung. Dies geschieht dadurch, daß bis zum Erreichen des Gleichgewichtes, ein elektrischer Strom fließt. Aus der Richtung des Nettostroms beim Startvorgang kann man tatsächlich auf die Ladung der Elektrode im Vergleich zur Lösung schließen. Wird jedoch ein geschlossener Stromkreis über längere Zeit betrieben, enthält die Aussage, daß eine Elektrode Elektronen aufnimmt, keine Informationen über ihre Ladung. Es zeigt sich sogar, daß man, wenn man nicht weiß, ob das System als galvanische Zelle oder als Elektrolysezelle betrieben wird, nicht einmal aus der Polung der Elektroden allein schließen kann, in welche Richtung der Strom fließt (s. Kap. 5.2.4).

Die Definition der Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol', ausgehend von der Richtung des Stromflusses ist nicht korrekt, aber verbreitet. Das kann an der Tatsache liegen, daß der stationäre Zustand mit einem Startvorgang verwechselt wird.

Stellungnahme 19: Eine Folge der Verwechslung eines stationären Zustandes mit einem Startvorgang

GARNETT & TREAGUST (1992b) stellten fest, daß Schüler, wenn sie einer Elektrode eine Ladung zuordnen, entweder ein Problem mit der Richtung des Ionenflusses in der Lösung oder mit der Richtung der Elektronenbewegung im äußeren Stromkreis haben.

The notion of a charged electrode is erroneous. Students who think the anode is negatively charged are unable to explain why anions drift toward the anode. In contrast those who believe the anode to be positively charged are unable to explain why electrons leave the anode and move to the cathode.

(GARNETT & TREAGUST, 1992b)

Die Schlußfolgerung, die Vorstellung von einer geladenen Elektrode sei 'unrichtig', ist jedoch nur haltbar, wenn man eine ganze Halbzelle als 'Elektrode' bezeichnet.

In den Interviews gehen einige Schüler davon aus, daß bei der Elektrolysezelle der Minuspol der Spannungsquelle mit der positiven Elektrode und der Pluspol der Spannungsquelle mit der negativen Elektrode verbunden ist. Das gleiche Problem beschreibt MAROHN (1999).

In einer weiteren Aufgabenstellung sollten die Schüler die Elektroden einer Zelle zur Elektrolyse von Zinkbromid-Lösung als Minuspol bzw. Pluspol bezeichnen. Ein Drittel der Schüler nahmen eine falsche Zuordnung vor, obwohl die Pole der äußeren Spannungsquelle als Minus- und Pluspol gekennzeichnet waren.

[...] Die Schüler, die fälschlicherweise die mit dem Pluspol der Spannungsquelle verbundene Elektrode als Minuspol bezeichneten, gaben dafür folgende Begründung an:

- Weil die Elektrode Elektronen aus dem inneren Leiter (d. h. aus der Reaktion $2\text{Br}^- \rightarrow \text{Br}_2 + 2\text{e}^-$) aufnimmt, wird sie negativ geladen.
- Weil die Elektrode Elektronen an den äußeren Leiter abgibt, muß sie eine negative Ladung besitzen.
- Elektronen können nur zwischen einem Minuspol und einem Pluspol fließen.

(MAROHN, 1999, Seite 128f)

In den Interviews folgt eine solche Beschriftung aus der Annahme, daß sich die Richtung des Elektronenflusses direkt aus der Ladung an bestimmten Punkten des Stromkreises ergibt. So gehen einige Schüler davon aus, daß Elektronen immer vom 'Minuspol' zum 'Pluspol' fließen⁷⁵.

Aus naturwissenschaftlicher Sicht ist der Minuspol der Quelle mit der negativen Elektrode verbunden. Es wird angenommen, daß der Anschluß der Span-

⁷⁵ Auch die umgekehrte Annahme, daß Elektronen immer vom 'Pluspol' zum 'Minuspol' fließen, ist vertreten.

nungsquelle und die direkt mit ihm verbundene Elektrode auf dem gleichen Potential liegen. Die letzte Aussage ist nur dann richtig, wenn entweder kein Strom fließt oder der elektrische Widerstand der verwendeten Kabel vernachlässigbar klein ist. Ist das nicht der Fall, so ergibt sich nach dem OHM'SCHEN Gesetz aus der Stromstärke und dem Widerstand der Kabel ein Spannungsabfall. Der Anschluß der Quelle und die Elektrode liegen nicht auf dem gleichen Potential. Der Minuspol der Spannungsquelle ist bei einem realen, stromdurchflossenen Aufbau tatsächlich negativer als die mit ihr verbundene Elektrode. Die Elektronen fließen tatsächlich von Orten mit niedrigerem Potential zu Orten mit höherem Potential. Dieser Teil der Schülerargumentation ist im Prinzip richtig. Falsch ist jedoch die Schlußfolgerung, die Elektrode, die mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbunden ist, sei positiver als die andere Elektrode.

Die Ursache für die falsche Beschriftung der Spannungsquelle der Elektrolysezelle mit 'Minuspol' und 'Pluspol' in den Interviews ist, daß die Schüler nicht den gesamten Stromkreis, sondern lediglich den Weg vom Anschluß der Quelle bis zur Elektrode betrachten. Der Fehler ist somit eine Folge der *lokalen Argumentation* der Schüler (s. Kap. 2.3.5). Dabei folgen sie dem Weg der Elektronen und gehen bei jedem Teilstück des Weges davon aus, daß die Elektronen beispielsweise von einem negativen Punkt zu einem positiven Punkt fließen. Ihre Beschriftung sagt folglich nichts anderes aus, als daß der Minuspol der Quelle negativer sein muß als die mit ihm verbundene Elektrode⁷⁶. Das ist in einer realen, stromdurchflossenen Elektrolysezelle richtig. Betrachtet man die so erhaltene Beschriftung für das gesamte System (Abbildung 10 – Seite 150), wird sie falsch, da die mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbundene Elektrode nicht positiver sein kann als die mit dem Pluspol der Quelle verbundene Elektrode.

Stellungnahme 20: *Lokale Argumentation* führt zu einer falschen Beschriftung der Elektrolysezelle

⁷⁶ Für den positiven Pol der Quelle argumentieren die Schüler analog.

5.6.4.2 'Anode' / 'Kathode'

i) Die wissenschaftliche Definition der Begriffe 'Anode' und 'Kathode'

Die Begriffsnamen 'Anode' und 'Kathode' wurden durch FARADAY geprägt und von den Begriffen 'Pol' und 'Elektrode' (s. Kap. 5.6.4.1) klar unterschieden:

Die Oberflächen, an welchen, nach der gewöhnlichen Terminologie, der elektrische Strom zu dem zersetzt werdenden Körper hinein- oder hinaustritt, sind die wichtigsten Orte der Action und verdienen eigens unterschieden zu werden sowohl von den Polen, mit denen sie häufig, als von den Elektroden, mit denen sie immer in Berührung stehen.

(FARADAY, 1897, §663)

Die 'Anode' wird als die Oberfläche des zersetzt werdenden Körpers verstanden, durch die der elektrische Strom in ihn eintritt. Sie ist das negative Ende dieses Körpers. Die 'Kathode' ist die Oberfläche des Körpers, durch die der Strom austritt. Sie ist das positive Ende. Was die Richtung des Stroms betrifft, geht FARADAY davon aus, daß er von positiven zu negativen Teilen fließt. Diese Aussage soll nicht als "Meinung über die Natur des elektrischen Stromes" (FARADAY, 1897, §667) verstanden werden. Er schließt sich lediglich einer Konvention der Physiker an, um eine eindeutige Bezeichnung zu haben. Im Gegensatz zur 'Elektrode' und zum 'Pol' sind 'Anode' und 'Kathode' also ein Bestandteil des zersetzt werdenden Körpers, den FARADAY unter bestimmten Umständen als 'Elektrolyt' bezeichnet⁷⁷.

Die Anode ist daher die Oberfläche, durch welche, unserer gegenwärtigen Terminologie gemäss, der elektrische Strom eintritt; sie ist das negative Ende des zersetzt werdenden Körpers, das, wo Sauerstoff, Chlor, Säuren u. s. w. entwickelt werden, und steht der positiven Elektrode gegenüber. Die Kathode ist die Fläche, durch welche der Strom den zersetzt werdenden Körper verlässt, ist dessen positives Ende; an ihr werden brennbare Körper, Metalle, Alkalien und Basen entwickelt und sie steht mit der negativen Elektrode in Berührung.

(FARADAY, 1897, §663)

⁷⁷ Nur Körper, die durch den elektrischen Strom in ihre Elemente zerlegt werden, bezeichnet FARADAY (1897) als Elektrolyte. Dementsprechend ist Wasser ein Elektrolyt, Schwefelsäure nicht.

FARADAY sucht nach Begriffsnamen, aus denen sich seine Vorstellungen nicht ableiten lassen, da dies einen ungünstigen Einfluß auf die weitere Entwicklung der Wissenschaft haben könnte.

Allein diese Ausdrücke sind zu unbezeichnend für den Gebrauch, welchen ich von ihnen machen müßte, denn wiewohl die Ansichten vielleicht richtig sind, sind sie doch nur hypothetisch und vielleicht auch falsch; und dann fügen sie, vermöge eines zwar unmerklichen aber, weil er unausgesetzt wirkt, doch sehr gefährlichen Einflusses der Wissenschaft einen grossen Nachteil zu, indem sie Diejenigen, welche mit den Fortschritten derselben beschäftigt sind, auf die gewohnten Ansichten einengen und beschränken.
(FARADAY, 1897, §665)

Die Begriffsnamen 'Anode' und 'Kathode' leitet er wie folgt ab:

Nach einer Bezeichnung suchend, auf welche ich als eine normale die elektrische Richtung beziehen könnte, ausdrucksvoll hinsichtlich ihrer beiden Verschiedenheiten und frei von aller Theorie, glaubte ich eine solche in der Erde zu finden. Wenn der Magnetismus der Erde von elektrischen Strömen herrührt, welche dieselbe umkreisen, so müssen sie eine beständige Richtung haben, welche, nach unserer gegenwärtigen Sprechweise, von Osten nach Westen, oder besser, da es dem Gedächtniss mehr zur Hülfe kommt, mit dem scheinbaren Laufe der Sonne gehen würde. Nehmen wir für irgend einen Fall von elektro-chemischer Zusammensetzung an, der zersetzt werdende Körper sei so gestellt, dass der durch ihn gehende elektrische Strom parallel und in gleicher Richtung gehe mit dem in der Erde vorhandenen sein sollenden, so werden die Oberflächen, durch welche die Elektrizität zur Substanz ein- und austritt, eine unveränderliche Beziehung haben und beständig dieselben Kraftverhältnisse zeigen. Hiernach schlagen wir vor: die östliche Fläche Anode ($\alpha\nu\alpha$, aufwärts, $\delta\delta\omicron\varsigma$, Weg; der Weg vom Sonnenaufgang) und die westliche Kathode ($\kappa\alpha\tau\alpha$, niederwärts, und $\omicron\delta\omicron\varsigma$; der Weg zum Sonnenuntergang) zu nennen.
(FARADAY, 1897, §662)

Die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' werden heute anders verwendet. Der Begriff 'Elektrode' in seiner heutigen Bedeutung (s. Kap. 5.6.4.1) gilt als Oberbegriff der Begriffe 'Anode' und 'Kathode'. Beide sind folglich 'Elektroden'. Auch in ihrer heutigen Bedeutung beinhalten sie eine Information über die Richtung des Stromflusses. Es ist dabei jedoch von Nettoströmen die Rede. Dies hängt mit der Vorstellung zusammen, daß an den Elektroden Hin- und Rückreaktionen stattfinden. Die IUPAC definiert die Begriffe wie folgt:

A current (of positive electricity) passing from the electrode into the electrolyte is taken as positive.

An electrode at which a net positive current flows is called an *anode*. The chemical reaction which predominates at an anode is an *oxidation*.

An electrode at which a net negative current flows is called a *cathode*. The chemical reaction which predominates at a cathode is a *reduction*.

This convention is recommended so that, for example, the effective resistance of an electrode interface is positive under normal conditions. The opposite convention is widely used particularly in electroanalytical literature.

(IUPAC, 1974, Seite 512)

Was die Richtung des Stroms betrifft, so stimmt dies mit der Definition von FARADAY überein. Aber 'Anode' und 'Kathode' werden hier nicht mehr als Teil des Elektrolyten aufgefaßt.

Auffällig ist, daß in der IUPAC-Definition nicht von positiven und negativen 'Elektroden' die Rede ist. Das liegt daran, daß beispielsweise eine 'Anode' nicht immer die gleiche Ladung trägt. In einer galvanischen Zelle ist die 'Anode' negativ und die 'Kathode' positiv geladen. In eine Elektrolysezelle ist die 'Anode' hingegen positiv, während die 'Kathode' negativ geladen ist.

Die Elektrode, an der die Oxidation erfolgt, heißt *Anode*; die Elektrode, an der die Reduktion erfolgt, heißt *Kathode*. Wenn eine elektrochemische Zelle als Stromquelle dient (in diesem Fall heißt sie *galvanische Zelle*), hat die Kathode ein höheres Potential als die Anode. Das liegt daran, daß das Teilchen A, welches reduziert wird, von seiner Elektrode (von der Kathode) Elektronen abzieht, so daß dort eine positive Ladung zurückbleibt, entsprechend einem hohen Potential. An der Anode wird B oxidiert und überträgt dabei Elektronen auf die Elektrode, so daß die Anode schließlich eine negative Ladung und damit ein niedriges Potential erhält. Bei einer Elektrolyse wird die Reaktion durch einen extern erzeugten Strom angetrieben; dabei ist die Anode definitionsgemäß nach wie vor die Elektrode, an der die Oxidation erfolgt. An der Kathode werden dann die für die Reduktion benötigten Elektronen zur Verfügung gestellt. Aus diesem Grund muß die Anode gegenüber der Kathode positiv geladen sein.

(ATKINS, 1990, Seite 254)

Die Ausdrücke Anode und Kathode haben nur dann einen Sinn, wenn ein Strom fließt. Sie haben nichts mit dem Vorzeichen (+ oder -) der Elektrode zu tun: Letzteres bezieht sich auf das Potential der Elektrode.

(KORTÜM, 1966)

Diese Tatsache wird oft übersehen. So definiert das *Römpp Chemielexikon* den Begriff 'Kathode' folgendermaßen:

Kathode [...] Bez. für die neg. geladene Elektrode (Minuspol), durch die der neg. Strom in den Elektrolyten austritt (in die der pos. Strom aus dem Elektrolyten eintritt). Beim Stromdurchgang wandern die Kationen an die K. u. werden dort entladen, wobei ggf. kathodische Reduktion [...] u. a. Prozesse stattfinden.
(FALBE & REGITZ, 1997, Seite 2099)

Es scheint FARADAY also nicht gelungen zu sein, Begriffsnamen zu finden, die keine Vorstellungen transportieren. Das hängt möglicherweise mit seiner Definition der Begriffe 'Anion' und 'Kation' zusammen, die im letzten Satz des obigen Zitates angesprochen wird.

Endlich habe ich Namen nöthig, um diejenigen Körper zu bezeichnen, welche zu den Elektroden, oder, wie man sie gewöhnlich nennt, zu den Polen zu gehen vermögen. [...]
Zur Unterscheidung dieser Körper schlage ich vor, diejenigen, welche zu der Anode des zersetzenden Körpers gehen, Anionen ($\alpha\nu\iota\omicron\nu$, das Hinaufgehende) und die, welche zu der Kathode gehen, Kationen (von $\kappa\alpha\tau\iota\omicron\nu$, das Herabgehende) zu nennen, und wenn ich Gelegenheit habe, gemeinschaftlich von beiden zu sprechen, werde ich sie Ionen nennen.
(FARADAY, 1897, §665)

Heute ist der Begriff 'Anion' ein Sammelbegriff für negativ geladene Ionen und der Begriff 'Kation' steht für positiv geladene Ionen.

Kationen. Sammelbez. für pos. geladene Ionen, die z.B. in wäss. Lsg. unter dem Einfluß des elektr. Stroms in einer Elektrolysezelle zur Kathode [...] wandern.
(FALBE & REGITZ, 1997, Seite 2179)

Das steht in keinem Widerspruch zu der Feststellung, daß 'Anionen' immer zur 'Anode' wandern. Dies ist jedoch für die galvanische Zelle, in der die 'Anode' negativ geladen ist, schwer einsehbar. Um zu verstehen, warum sich in diesem Fall negative Ionen auf die negative Elektrode zu bewegen, braucht man eine genaue Vorstellung von der Umgebung der Elektrode, die beispielsweise als Doppelschicht beschrieben werden kann (s. Kap. 5.4.4). Dieses Problem gab es

für FARADAY schon allein deswegen nicht, weil er Ionen nicht als geladene Teilchen ansah⁷⁸:

So ist Chlorblei ein Elektrolyt und wenn es elektrolysiert wird, entwickelt es zwei Ionen, Chlor und Blei; das erste ist ein Anion und das letztere ein Kation.

(FARADAY, 1897, §665)

Die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' sind über die Richtung des elektrischen Stroms definiert. Das ist der wesentliche Unterschied zu den Begriffen 'Minuspol' und 'Pluspol', die wie bereits in Kapitel 5.6.4.1 festgestellt wurde, nicht eindeutig mit der Stromrichtung verknüpft sind. Daher ist die Ladung einer Anode in einer galvanischen Zelle eine andere als in einer Elektrolysezelle. Im Gegensatz zu den Begriffen 'Minuspol' und 'Pluspol' sind die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' nur für ein stromdurchflossenes System definiert.

Die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' können in der Elektrochemie wie folgt definiert werden:

An der '**Anode**' findet eine **Oxidation** statt, an der '**Kathode**' eine **Reduktion**⁷⁹.

Im Gegensatz zu den Begriffen 'Minuspol' und 'Pluspol' beinhalten die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' eine Information über die Richtung des elektrischen Stroms. Darum können die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' nicht direkt mit den Begriffen 'Pluspol' und 'Minuspol' verknüpft sein. So ist beispielsweise die

⁷⁸ Es ist zu beachten, daß die damaligen Vorstellungen über die Natur des elektrischen Stroms und den Aufbau der Materie von den heutigen abweichen.

⁷⁹ Diese Definition ist eine Vereinfachung und gilt nicht für die Physik. Dort wird zum Beispiel von *Glühkathoden* gesprochen. Mit ihnen können Elektronenstrahlen erzeugt werden (z. B. in den Bildröhren von Fernsehern). An einer solchen Kathode findet keine Reduktion statt. Die IUPAC-Definition (s. Seite 172) ist aber auch hier im Prinzip anwendbar. Ein Strom von negativen Ladungen verläßt die Elektrode. Das entspricht einem negativen Nettostrom an der Elektrode, die folglich eine Kathode ist. Die Elektronen gelangen jedoch nicht in einen Elektrolyten, sondern werden in ein Vakuum emittiert. Sie können daher keine Reduktion auslösen. Auch in der Physik ist eine Kathode nicht immer der Minuspol. Während eine *Glühkathode* der Minuspol ist, ist eine *Photokathode* der Pluspol. Letzteres gilt für einen Aufbau zur quantitativen Messung des *Photoeffektes* mit der Gegenfeldmethode.

'Anode' einer galvanischen Zelle der 'Minuspol', während sie bei einer Elektrolysezelle der 'Pluspol' ist.

Im Gegensatz zu 'Minuspol' und 'Pluspol' gibt es nur dann eine 'Anode' und eine 'Kathode', wenn ein Strom fließt. Es macht folglich keinen Sinn, bei einer galvanischen Zelle, deren Elektroden nur über ein Voltmeter⁸⁰ miteinander verbunden sind, von 'Anode' und 'Kathode' zu sprechen.

Stellungnahme 21: Definition der Begriffe 'Anode' und 'Kathode' und deren Unterschied zu 'Minuspol' und 'Pluspol'

ii) Die Verwendung der Begriffe durch Schüler

Die meisten Schüler verknüpfen die Begriffspaare 'Anode', 'Kathode' und 'Pluspol', 'Minuspol' direkt miteinander. Dabei kommen beide Verknüpfungsmöglichkeiten vor. So kann beispielsweise der Begriff 'Anode' als Synonym für 'Pluspol' oder für 'Minuspol' angesehen werden.

Das Beispiel von S1 macht deutlich, daß die direkte Verknüpfung nicht dadurch überwunden werden kann, daß der Lehrer sagt, daß die Verknüpfung bei der einen Zellart anders ist als bei der anderen. Dadurch wird die direkte Verknüpfung nicht aufgegeben, es wird lediglich eine andere Verknüpfung hinzugefügt. Einige Zeit, nachdem Elektrochemie im Unterricht behandelt wurde, erinnert sich S1 nur noch daran, daß es "Bereiche" gibt, in denen die Verknüpfung anders ist, als die, die er sich gemerkt hat. Weil die Elektrolysezelle in Skizze 2 der galvanischen Zelle in Skizze 1 sehr ähnlich ist, kann sich der Schüler nicht vorstellen, daß hier unterschiedliche Definitionen verwendet werden. Werden die Begriffe synonym verwendet, ist nicht einsehbar, warum es unterschiedliche Verknüpfungen geben sollte. S3 erinnert sich zwar daran, daß die Verknüpfung bei einer galvanischen Zelle eine andere ist als bei einer Elektrolysezelle, aber er verwendet die Begriffspaare trotzdem synonym. Für ihn ist beispielsweise der Begriff 'Anode' "normalerweise" gleichbedeutend mit 'Pluspol'. Den Normalfall stellt für ihn die Elektrolyse dar. Der Schüler hat gelernt, daß die galvanische Zelle die Umkehrung der Elektrolyse ist. Folglich

kehrt er auch die Verknüpfung der Begriffspaare um – führt also eine neue synonyme Verwendung ein: der Begriff 'Anode' ist bei der galvanischen Zelle gleichbedeutend mit 'Minuspol'. Da er nicht die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' sondern die Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' mit den Begriffen 'Oxidation' und 'Reduktion' verknüpft, beschriftet er die galvanische Zelle falsch (s. Seite 152). Auch GARNETT & TREAGUST beschreiben das Problem, daß die Feststellung, daß die Elektrolyse die Umkehrung der galvanischen Zelle ist, falsch interpretiert werden kann.

Misconception 12c: Processes at the anode and cathode are reversed in electrochemical and electrolytic cells; in electrolytic cells oxidation occurs at the anode and reduction at the cathode, whereas in electrochemical cells oxidation occurs at the cathode and reduction at the anode. (The notion of reversing processes for electrochemical and electrolytic cells has been mentioned previously by Anna. [...])

(GARNETT & TREAGUST, 1992b)

Daß es auch gute Argumente dafür gibt, anzunehmen, daß die Begriffspaare 'Anode', 'Kathode' und 'Minuspol', 'Pluspol' direkt miteinander verknüpft sind, zeigt das Interview mit S7. Dieser Schüler geht zunächst davon aus, daß es nur in der Physik, nicht aber in der Chemie, einen festen Zusammenhang zwischen den Begriffspaaren gibt. Für ihn findet an der 'Anode' immer eine Oxidation und an der 'Kathode' immer eine Reduktion statt. Als er jedoch feststellt, daß die Elektronen in seiner Beschreibung immer durch den äußeren Stromkreis von der 'Anode' zur 'Kathode' wandern, ändert er seine Meinung, da er die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' über die Richtung des Stromflusses definiert. Von da an geht er davon aus, daß die 'Anode' immer der 'Minuspol' ist.

Einige Schüler geben noch eine weitere gute Begründung dafür an, daß die Begriffspaare direkt miteinander verknüpft seien: Sie gehen davon aus, daß die 'Anionen' sich immer auf die 'Anode' und die 'Kationen' sich immer auf die 'Kathode' zubewegen. Das entspricht der Definition der Begriffe 'Anion' und

⁸⁰ Ein ideales Voltmeter hat einen unendlich großen elektrischen Widerstand.

'Kation' durch FARADAY. Im Gegensatz zu ihm haben die Schüler jedoch die heutige Definition der Begriffe 'Anion' und 'Kation' verinnerlicht, nach der 'Anionen' negativ und 'Kationen' positiv geladen sind. Ausgehend von ihrer Kenntnis der Wechselwirkung von elektrischen Ladungen schließen sie daraus, daß die 'Anode' immer positiv und die 'Kathode' immer negativ geladen sein muß. Das Problem, daß es schwierig ist, einzusehen, daß sich in einer galvanischen Zelle negative Ionen auf eine negative Elektrode zu bewegen, wurde bereits in Kap. 5.4.4 beschrieben. Die Tatsache, daß Schüler die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' über die Ionenbewegungen definieren, wird auch von anderen Forschern beschrieben:

Die zweite Mehrfachwahlaufgabe wurde analog zur ersten Aufgabe gebildet, mit dem Unterschied, daß die Kathode nicht anhand des Elektronentransfers zugeordnet werden sollte, sondern aufgrund der Bewegungsrichtung der Kationen in der Lösung. [...]

Der größte Teil der Schüler argumentierte über die gegenseitige Anziehung ungleichnamiger Ladungen:

- Da sich die Kationen zur Kathode hinbewegen, muß die Kathode negativ geladen sein.
- Da sich die Kationen von der Kathode wegbegeben, muß die Kathode positiv sein.

(MAROHN, 1999, Seite 113)

Misconception 11a: The anode is negatively charged and because of this it attracts cations; the cathode is positively charged and because of this it attracts anions.

(GARNETT & TREAGUST, 1992b)

Eine weitere logische Verknüpfung zwischen den Bezeichnungen für Ionen und für Elektroden beschreiben SANGER & GREENBOWE:

Misconception 8d (anodes, like anions, are always negatively charged; cathodes, like cations, are always positively charged)

(SANGER & GREENBOWE, 1997)

Vier der Befragten geben die aus wissenschaftlicher Sicht korrekte Definition an. Demnach findet an der 'Anode' immer eine Oxidation und an der 'Kathode' immer eine Reduktion statt. Keiner dieser Schüler verwendet jedoch ausschließlich diese Definition. Alle verknüpfen das Begriffspaar zusätzlich mit 'Minuspol' und 'Pluspol'. Die gleichzeitige Verwendung unterschiedlicher Begriffsdefinitionen führt dabei oft zu Widersprüchen. S8 bemerkt diese Widersprüche. Er geht davon aus, daß die 'Anode' immer der 'Minuspol' ist und daß

dort immer eine Oxidation stattfindet. Außerdem geht er davon aus, daß am 'Minuspol' einer Elektrolysezelle immer eine Reduktion stattfinden muß. Um diesen Widerspruch aufzulösen, gibt der Schüler die wissenschaftlich korrekte Definition der Begriffe 'Anode' und 'Kathode' auf. Sie scheint aus seiner Sicht am wenigsten zu überzeugen.

S3 definiert die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' unter anderem über den Elektronentransfer an den Elektroden, ohne dabei die Begriffe 'Oxidation' und 'Reduktion' zu verwenden. Auch er kommt zu widersprüchlichen Aussagen, da er noch andere Begriffsdefinitionen benutzt. Er löst diesen Konflikt, indem er einen *Perspektivenwechsel* vollzieht (s. Kap. 5.7.2.3).

MAROHN beschreibt Argumentationsweisen, die den hier beschriebenen ähneln:

Neben der Gleichsetzung von Kathode und Minuspol zeigten sich drei weitere Argumentationsweisen:

- die Definition der Kathode über den Begriff *Reduktion*
- die Definition der Kathode über den Elektronentransfer an den Elektroden *ohne* Verwendung der Begriffe Reduktion und Oxidation
- die Definition der Kathode über die Bewegungsrichtung der Kationen in der Lösung

(MAROHN, 1999, Seite 112)

Die Schüler benutzen drei unterschiedliche Definitionen der Begriffe 'Anode' und 'Kathode'. Dabei werden oft von einem Schüler mehrere Definitionen gleichzeitig verwendet:

1. Die Begriffe werden als Synonyme von 'Minuspol' und 'Pluspol' angesehen (z. B.: Die 'Kathode' ist immer der 'Minuspol').
2. Die Begriffe werden mit der Bewegungsrichtung von Ionen in Beziehung gesetzt (z. B.: 'Anionen' bewegen sich auf die 'Anode' zu).
3. Die Begriffe werden über Elektrodenprozesse definiert (z. B.: An der 'Anode' findet eine 'Oxidation' statt, oder an der 'Anode' findet immer eine 'Elektronenabgabe' statt)

Die erste Definition läßt sich mit der zweiten begründen, wenn man davon ausgeht, daß beispielsweise 'Anionen' negativ geladene Ionen sind.

Auch aus der dritten Definition kann die erste abgeleitet werden, wenn man fälschlicherweise annimmt, daß die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' etwas über die Richtung des elektrischen Stroms aussagen (s. Stellungnahme 18 und Stellungnahme 19).

Die Feststellung, daß die Begriffspaare 'Anode', 'Kathode' und 'Minuspol', 'Pluspol' bei einer galvanischen Zelle anders miteinander verknüpft sind als in einer Elektrolysezelle reicht nicht aus. Die Begriffe werden trotzdem weiter als Synonyme verwendet. In diesem Fall ist die Existenz unterschiedlicher Verknüpfungen nicht einsehbar. Daher wird schnell vergessen, wann welche Verknüpfung gültig ist.

Stellungnahme 22: Schülerdefinitionen für 'Anode' und 'Kathode'

MAROHN (1999) stellt in ihrer Schulbuchanalyse (s. Kap. 2.2) fest, daß die meisten der von ihr untersuchten Schulbücher bei der Definition der Begriffe 'Anode' und 'Kathode' die Begriffe 'Oxidation' und 'Reduktion' nicht verwenden. In einem Buch werden die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' und die Bewegungsrichtungen der Ionen miteinander verknüpft. Eine aus wissenschaftlicher Sicht korrekte Einführung der Begriffe fehlt folglich in einigen Schulbüchern. Eine direkte Verknüpfung der Begriffspaare 'Anode', 'Kathode' und 'Minuspol', 'Pluspol' wird zwar nicht vorgenommen, es wird aber auch in keinem der Bücher thematisiert, daß die Verknüpfung bei einer galvanischen Zelle anders ist als bei einer Elektrolysezelle.

Wie bereits zuvor beschrieben wurde, ist es schwer einzusehen, daß sich in einer galvanischen Zelle negative Ionen auf eine negative Elektrode zu bewegen (s. Kap. 5.4.4). Das dürfte wohl der Grund dafür sein, daß in drei der vier von MAROHN (1999) untersuchten Schulbücher die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' nur im Zusammenhang mit Elektrolysezellen, die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' hingegen sowohl für Elektrolysezelle als auch für galvanische Zellen verwendet werden. Die Schüler kennen die heutige Verwendung der Begriffe 'Kation' und 'Anion', nach der diese direkt mit der Ladung der Ionen verknüpft sind. Wird davon ausgegangen, daß sich die negativen Anionen im-

mer auf die Anode zubewegen, so ist auf den ersten Blick schwer einsehbar, daß die Anode einer galvanischen Zelle negativ geladen ist.

Einen Hinweis dafür, daß diese Strategie von manchen Lehrern übernommen wird, enthält ein Brief eines Lehrers an Prof. Schmidt von der Universität Dortmund. In ihm kommentiert der Lehrer eine der von MAROHN verwendeten Aufgaben zur Elektrochemie. In dieser Aufgabe geht es darum, daß sich in einer galvanischen Zelle positive Kationen auf die positive Kathode zubewegen.

Eigentlich ist mir die Antwort hier klar. An der Kathode finden die Reduktionsvorgänge statt, und das ist in dem Fall die Kupferelektrode, also der Pluspol. Aber ist das nicht ein Beispiel dafür, daß es wenig sinnvoll ist, beim galvanischen Element die Begriffe Kathode und Anode zu verwenden? Mir genügt es, wenn die Schüler erkennen, welches der Plus- und welches der Minuspol ist. Deshalb wird das wohl auch keiner richtig zugeordnet haben. Die Begriffe Kathode und Anode benutze ich nur bei der Elektrolyse (wie auch das von uns verwendete Lehrbuch vom Buchner-Verlag).
(Auszug aus einem Brief eines Chemielehrers)

MAROHN stellt fest, daß diese Strategie die "Gefahr" birgt, "daß die Kathode grundsätzlich mit dem Minuspol, die Anode mit dem Pluspol einer elektrochemischen Zelle gleichgesetzt wird" (MAROHN, 1999, Seite 90). Das liegt daran, daß dabei der Begriff 'Anode' nur im Zusammenhang 'Pluspol', und der Begriffe 'Kathode' immer im Zusammenhang mit 'Minuspol' verwendet wird.

Wenn man sich dafür entscheidet, die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' im Unterricht zu verwenden, sollte man sie nicht nur für Elektrolysezellen – wie oft üblich –, sondern auch für galvanische Zellen verwenden. Sonst werden die Begriffe von den Schülern nur als Synonyme der Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' aufgefaßt.

Die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' können klar über die Begriffe 'Oxidation' und 'Reduktion' definiert werden. Diese Definition erscheint auch deswegen sinnvoll, weil sie die Aufmerksamkeit auf die chemischen Prozesse in den Zellen lenkt.

Eine Diskussion über den Zusammenhang der Begriffe 'Anode', 'Kathode' und 'Minuspol', 'Pluspol' erscheint sinnvoll. Dabei können galvanische Zellen und Elektrolysezellen miteinander verglichen werden.

Stellungnahme 23: Verwendung der Begriffe 'Anode' und 'Kathode' im Unterricht

Unter Chemiedidaktikern wird seit längerer Zeit diskutiert, die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' aus dem Schulunterricht zu verbannen. GERHARTL (1998) berichtet, daß diese Begriffe in den siebziger Jahren aus dem niederländischen Lehrplan gestrichen wurden.

Sie seien – so wurde und wird gemeint – nicht nur überflüssig sondern sogar schädlich zur Begriffsbildung. Letzteres wurde mit Sicherheit inspiriert durch die elektrolyse-orientierte Regel "KNAP" (**K**athode **N**egativ, **A**node **P**ositiv), aber das sollte noch kein Grund sein, um die Meinung des kanadischen Chemikers LAIDLER zu übernehmen. Er betonte: "At the present time there is no need for the words 'anode' and 'cathode'; the expressions 'positive electrode' and 'negative electrode' are much more meaningful and are quite unambiguous".

Fragen Sie bitte nicht, wie diese These zu verteidigen ist, denn sie würde bedeuten, daß entweder sämtliche Elektrochemiker doof sind oder weltweit eine Kongsu bilden, um wieder besseren Wissens immer noch von Anoden und Kathoden zu reden!

(GERHARTL, 1998)

Es ist unzweifelhaft richtig, daß die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' eindeutig sind. Aber das sind die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' auch. Die vorliegende Untersuchung zeigt jedoch, daß die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' von Schülern nicht so benutzt werden wie von den Wissenschaftlern. In der Bedeutung, die Schüler ihnen beimessen, sind sie alles andere als eindeutig (s. Kap. 5.6.4.1). Das Argument der Eindeutigkeit kann also nicht herangezogen werden, um eine Entscheidung gegen die Verwendung der Begriffe 'Anode' und 'Kathode' zu fällen. Die Tatsache, daß die Schüler diese Begriffe nicht richtig verwenden, ist wenig verwunderlich, wenn man davon ausgeht, daß die im Unterricht verwendeten Definitionen denen der Schulbücher entsprechen.

Außerdem gibt es ein einfaches Argument dagegen, die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' aus dem Unterricht zu verbannen: selbst wenn der Lehrer diese Begriffe nicht verwendet, kann es sein, daß die Schüler sie anbringen. Schließlich

werden die Begriffe außerhalb der Schule oft verwendet. Das gleiche gilt allerdings auch für die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol'. Ein Schüler, der eine Batterie in ein Gerät einlegt, ist nur an deren Polung und nicht etwa daran, wo die Anode ist, interessiert. Ein weiteres Argument für die Pole ist, daß in dem, in der Schule üblichen Aufbau, bei dem die Elektroden einer galvanischen Zelle nur über ein Voltmeter miteinander verbunden sind, weder eine 'Anode' noch eine 'Kathode', wohl aber die beiden Pole existieren.

Es gibt Argumente dafür, in der Schule die Begriffe 'Anode', 'Kathode' und 'Minuspol', 'Pluspol' für alle elektrochemischen Zellen zu verwenden. Beide Begriffspaare können relativ einfach und eindeutig definiert werden (s. Stellungnahme 17 und Stellungnahme 21).

Die Betrachtung eines Akkumulators ist hilfreich (MORAN, GILEADI, 1989; SCHMIDT, 1998, Seite 95ff). Beim Aufladen wird er als Elektrolysezelle betrieben. Hier findet an der Anode eine Oxidation statt. Sie ist positiv geladen, die Ladung der Elektrode wird von außen vorgegeben. Diese Ladung bewirkt die chemische Reaktion. Den Teilchen, die oxidiert werden, werden an der Anode durch deren positive Ladung Elektronen entzogen. Beim Entladen wird der Akkumulator als galvanische Zelle betrieben. Auch hier findet an der Anode eine Oxidation statt. Diesmal ist es jedoch die chemische Reaktion, die die Ladung der Elektrode aufrecht hält. Die Tatsache, daß die Teilchen Elektronen an die Elektrode abgeben, erklärt die Aufrechterhaltung einer negativen Ladung. Diese Argumentation entspricht der von Stellungnahme 3. Bei ihr muß klar zwischen Startvorgang und stationärem Zustand unterschieden werden (Stellungnahme 4 und Stellungnahme 19).

Stellungnahme 24: Beide Begriffspaare – 'Anode', 'Kathode' und 'Pluspol', 'Minuspol' – verwenden

5.6.4.3 *Elektrolyse*

i) Die wissenschaftliche Definition der Begriffes 'Elektrolyse'

Im Jahre 1800 gelang NICHOLSON und CARLISLE erstmals die Elektrolyse von Wasser (DUNSCH 1985, Seite 115). RITTER führte unabhängig davon im selben Jahr den gleichen Versuch durch. Er war der erste, der Wasserstoff und Sauerstoff gleichzeitig und getrennt auffing und die Knallgasmischung zur Ex-

plosion brachte (HERMANN, 1986, Seite 48f). Den Begriffsnamen 'Elektrolyse' prägte FARADAY:

Dann werden ich für den Ausdruck: elektro-chemisch zersetzt oft den [...]: elektrolysiert gebrauchen, damit bezeichnend, dass der in Rede gestellte Körper unter dem Einflusse der Elektrizität in seine Bestandteile zerlegt werde. Das Wort ist im Sinn und Klang analog dem: analysiren, dessen Herleitung auch ähnlich ist.
(FARADAY, 1897, §664)

Aus heutiger Sicht ist nicht die Zersetzung eines Körpers das entscheidende Merkmal einer 'Elektrolyse', sondern daß eine äußere Spannungsquelle die Vorgänge im inneren der Zelle auslöst.

Eine elektrochemische Zelle besteht aus zwei Elektroden, die in einen Elektrolyten eintauchen. Wenn sie zur Erzeugung von Strom dient, heißt sie *galvanische Zelle*. Wird dagegen mit Hilfe einer äußeren Stromquelle eine Reaktion im Inneren der Zelle angetrieben, so spricht man von einer *elektrolytischen Zelle*.
(ATKINS, 1990, Seite 266)

Das bedeutet, daß die Reaktionen in einer galvanischen Zelle freiwillig ablaufen, in der Elektrolysezelle werden sie durch die äußere Spannungsquelle erzwungen.

Der entscheidende Unterschied zwischen einer Elektrolysezelle und einer galvanischen Zelle ist, daß bei der Elektrolyse die chemischen Reaktionen von außen erzwungen werden, während sie bei einer galvanischen Zelle freiwillig ablaufen.

Stellungnahme 25: Unterscheidung einer Elektrolysezelle von einer galvanischen Zelle

ii) Die Verwendung des Begriffes durch Schüler

Die Elektrolyse wird von einigen Schülern als Umkehrung der galvanischen Zelle begriffen. Aus den Interviews lassen sich die folgenden *kritischen Attribute* (s. Kap. 2.1) erkennen, die die Schüler dem *Begriff* 'Elektrolyse' zuordnen:

1. Existenz einer Quelle
2. Elektrolysezelle enthält kein Diaphragma
3. Es müssen bestimmte Produkte entstehen

Stellungnahme 26: *Kritische Attribute*, die Schüler dem Begriff 'Elektrolyse' zuordnen

Von diesen Attributen ist aus wissenschaftlicher Sicht nur das erste ein *kritisches Attribut* für den Begriff 'Elektrolyse'.

Die Schüler überlegen sich, ob die Skizze 2 eine Elektrolyse darstellt oder nicht. Das die Existenz des Diaphragmas als Gegenargument aufgefaßt wird, ist nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, daß im Unterricht oft nur Elektrolysen ohne Diaphragma diskutiert werden⁸¹. Auch wenn den Schülern nicht gesagt wurde, daß Elektrolysen immer ohne Diaphragma ablaufen, schließen sie das aus den ihnen bekannten Beispielen. Das gleiche gilt für das dritte Attribut aus Stellungnahme 26. Diese Feststellung steht im Einklang mit der lerntheoretischen Beschreibung der *Begriffsbildung*. Diese stellt einen aktiven Prozeß dar (EDELMAHN, 1986). Bei der Bildung von "Eigenschaftsbegriffen werden konkrete Einzelfälle aufgrund gemeinsamer Merkmale (kritischer Attribute) zu Klassen (Kategorien) zusammengefaßt. Die Gesamtheit der Attribute bildet den Inhalt des Begriffes und die Gesamtheit der erfaßten Gegenstände wird als Umfang bezeichnet" (EDELMAHN, 1986, Seite 225).

Die Schüler leiten die *kritischen Attribute* aus den im Unterricht diskutierten Beispielen ab. Nicht alle dieser Attribute müssen vom Lehrer genannt worden sein.

Stellungnahme 27: *Begriffsbildung* anhand von Beispielen

5.7 Perspektivenwechsel

Viele Vorgänge kann man ausgehend von unterschiedlichen Perspektiven beschreiben. Dadurch, daß nicht klar ist, welche Perspektive verwendet wird, kann eine Aussage ihre Eindeutigkeit verlieren. So kann eine Situation ausgehend von verschiedenen Perspektiven mit unterschiedlichen Aussagen beschrieben werden, die gegensätzlich zu sein scheinen, wenn man die verschiedenen Blickwinkel nicht beachtet. Das gilt für die Alltagssprache genauso wie für die Wissenschaftssprache.

⁸¹ Das Diaphragmaverfahren bei der Chloralkali-Elektrolyse ist ein Beispiel für eine Elektrolyse mit einem Diaphragma.

Ein alltägliches Beispiel stellen zwei Personen dar, die sich gegenüberstehen und einander anblicken. Wenn die eine Person zu der anderen sagt, daß deren linker Ärmel verschmutzt ist, so könnte sich der Adressat der Botschaft folgendes fragen: 'Meint mein Gegenüber meinen rechten Ärmel – der von ihm aus gesehen links ist – oder hat er seine Botschaft bereits in meine Perspektive übersetzt und er meint den für mich linken Ärmel?' Die Aussage ist nicht eindeutig, da sie keine Angaben über die verwendete Perspektive enthält und beide Perspektiven üblich sind.

Dieses Beispiel verdeutlicht eine grundsätzliche Eigenschaft von Kommunikation. Eine Aussage muß alle Informationen enthalten, die der Empfänger benötigt, um den Gedankengang des Senders nachzuvollziehen. Es ist für den Sender nicht immer einfach, zu entscheiden, welche Informationen der Empfänger benötigt, um die Aussage zu verstehen. Die Angabe aller mit dem Thema zusammenhängenden Informationen stört die Kommunikation, da die Aussage dadurch unübersichtlich wird. Daher werden Informationen weggelassen, von denen der Sender annimmt, daß sie dem Empfänger bekannt sind. Sprache enthält Informationen, die über ihren expliziten Gehalt hinausgehen. Im Laufe der Zeit findet eine Gewöhnung an die Auslassungen statt. Dem Sender ist nicht immer bewußt, daß er Informationen voraussetzt. Das trifft auf den naturwissenschaftlichen Sprachgebrauch genauso zu, wie auf die Alltagssprache (BURGER, 1996, S. 53).

MAROHN (1999) konnte zeigen, daß Schüler bei der Beschreibung von elektrochemischen Zellen unterschiedliche Perspektiven verwenden (s. Kap.2.2). Auch in den Gesprächen der vorliegenden Interviewstudie werden von den Schülern unterschiedliche Perspektiven verwendet. Einige Schüler wechseln die Perspektive innerhalb des Interviews.

Im folgenden werden die von den Schülern im Interview verwendeten Perspektiven, ihr Wechsel (Kap. 5.7.1) und – in einigen Fällen – Gründe für den Wechsel der Perspektive (Kap. 5.7.2) beschrieben. Die Ergebnisse werden später (Kap. 5.7.3) mit den Ergebnissen von MAROHN (1999) verglichen und diskutiert.

5.7.1 Art der Perspektiven

Bei der Beschreibung von elektrochemischen Zellen kann man unterschiedliche Perspektiven verwenden. Eine getroffene Aussage kann oft ausgehend von mehreren der folgenden Perspektiven gedeutet werden.

5.7.1.1 *Dynamischen Betrachtung* ↔ *statische Betrachtung*

Bei der Entscheidung, ob beispielsweise eine Elektrode positiv oder negativ geladen ist, kann man von einer statischen oder dynamischen Betrachtungsweise ausgehen. Dementsprechend kann man die Anzahl von positiven und negativen Teilchen in der Elektrode miteinander vergleichen oder die Flußrichtung geladener Teilchen betrachten (s. Kap. 5.6.1). Das kann dazu führen, daß einer Elektrode in einer gegebenen Situation unterschiedliche Ladungen zugesprochen werden. So kann eine Elektrode, die Elektronen aufnimmt, als positiv angesehen werden, da Elektronen von einer positiven Ladung angezogen werden⁸² (dynamische Betrachtung). Dadurch, daß die Elektrode Elektronen aufnimmt, ist sie, wenn der Stromfluß anschließend unterbrochen wird, negativ geladen. Es liegt ein Elektronenüberschuß vor (statische Betrachtung).

S9 beschreibt einen Laden-Entladen-Zyklus (s. Kap. 5.1.3). Dabei werden abwechselnd vier Stadien durchlaufen: Ladevorgang, geladener Zustand, Entladungsvorgang und ungeladener Zustand.

Wenn der Schüler beispielsweise beschreibt, daß nach dem Ladevorgang der äußere Stromkreis unterbrochen wird und die Zelle geladen ist, so vollzieht er einen Wechsel der Perspektive von einer dynamischen Betrachtung zu einer statischen Betrachtung. Wenn er dann beschreibt, daß der äußere Stromkreis mit einer Lampe geschlossen wird und die Zelle sich entlädt, betrachtet der Schüler wieder ein dynamisches System. In allen Fällen geht der Schüler davon aus, daß der Fluß von Elektronen aus den Ladungen resultiert (s. Kap. 5.7.1.2).

⁸² Dabei wird die Ladung als Ursache des Elektronenflusses angesehen (s. Kap. 5.7.1.2)

Das hat zur Folge, daß die Elektrode, die während des Ladevorganges positiv ist und daher von der Spannungsquelle Elektronen aufnimmt, in dem Moment negativ wird, in dem man den äußeren Stromkreis unterbricht. Sie wird dann als negativ angesehen, weil sie aufgrund der vorangegangenen Elektronenaufnahme einen Elektronenüberschuß hat.

[S9:] Die Zinkhalbzelle dadurch, daß sie Elektronen aufnimmt, wird negativ, ist aber in dem Moment, wo die Elektronen ihm zugefügt werden positiv. Weil [...] nur eine positive Halbzelle kann ja Elektronen aufnehmen. [...] Und die Kupferelektrode ist erst mal [...] negativ, weil die Elektronen von da kommen. Ja, auf jeden Fall genau das Gegenteil. [0:50 – Skizze 1]

Dieser Wechsel des Vorzeichens der Ladung ist nur auf den Wechsel der Perspektive der Betrachtung beim Übergang von der Beschreibung eines *Vorgangs* zu der Beschreibung eines *Zustandes* zurückzuführen. Der Schüler geht nicht davon aus, daß in dem Moment, in dem der äußere Stromkreis unterbrochen wird, eine Veränderung in der Elektrode stattfindet. Die Elektrode erhält während des Ladevorganges ihre Ladung und nicht im Moment des Unterbrechens des Stromkreises.

Auch beim Übergang vom geladenen Zustand zum Entladungsvorgang wird die Perspektive gewechselt. Dieses Mal von einer statischen zu einer dynamischen Beschreibung. In diesem Fall hat der Wechsel der Perspektive jedoch keine Veränderung des Vorzeichens der Ladung zur Folge. Die Elektrode, die im geladenen Zustand negativ ist, wird auch beim Entladungsvorgang als negativ angenommen. Sie gibt Elektronen ab, weil sie negativ ist und baut somit die Ladung ab, die sie während des Ladevorganges angesammelt hat.

Hier wird deutlich, daß der Grund für den plötzliche Wechsel des Vorzeichens der Ladung beim Übergang vom Ladevorgang zum geladenen Zustand nicht in einem unnötigen Perspektivenwechsel zu suchen ist, sondern im Fehlen eines anderen, notwendigen Perspektivenwechsels.

Beim Entladungsvorgang gibt die negative Elektrode Elektronen ab, weil sie negativ ist. Beim Ladevorgang hingegen ist die Ladung der Elektrode nicht die

Ursache für den Elektronenfluß, sie resultiert vielmehr aus ihm⁸³. Dem Schüler ist zwar klar, daß die Stromquelle das Aufladen der Zelle verursacht, bei der Argumentation mit den Begriffen 'Pluspol' und 'Minuspol' berücksichtigt er das jedoch nicht (s. Kap. 5.7.1.2).

Bei der dynamischen Betrachtung treten weitere Perspektivenwechsel auf (s. Kap. 5.7.1.2 bis Kap. 5.7.1.6).

5.7.1.2 Die Ladung ist die Ursache für den Elektronenfluß ↔ Der Elektronenfluß ist die Ursache für die Ladung (dynamische Betrachtung)

Die Ladung einer Elektrode kann als Ursache für den Stromfluß angesehen werden. Demnach gibt der Minuspol Elektronen ab, weil er negativ geladen ist, der Pluspol nimmt Elektronen auf, weil er positiv geladen ist.

Die Ladung der Elektrode kann jedoch auch durch den Stromfluß zustande kommen. Der Minuspol ist folglich deshalb negativ geladen, weil er Elektronen aufnimmt. Ursache für die positive Ladung des Pluspols ist, daß er Elektronen abgibt (s. Kap. 5.6.1).

Bei einem stationären Zustand kann nicht davon gesprochen werden, daß durch den Elektronenfluß eine Ladung aufgebaut wird. Hier zeigt sich, daß die Schüler keinen stationären Zustand beschreiben.

Ein ähnlicher Wechsel zwischen den Perspektiven ist – aus naturwissenschaftlicher Sicht – beim Vergleich einer galvanischen Zelle mit einer Elektrolysezelle sinnvoll. Bei der galvanischen Zelle sind die chemischen Reaktionen die Ursache für die Polung der Elektroden, bei der Elektrolysezelle wird die Polung der Elektroden von der Spannungsquelle vorgegeben und bewirkt die chemischen Reaktionen. Das eine Mal halten die chemischen Reaktionen und das andere Mal die externe Quelle die Spannung aufrecht.

⁸³ Diese Aussage gilt nur, wenn man wie S9 einen Laden-Entladen-Zyklus beschreibt. Dieser Zyklus stellt zu keinem Zeitpunkt einen stationären Zustand dar, für den eine solche Aussage falsch wäre.

Viele Schüler geben an, daß die Vorgänge in der galvanischen Zelle von allein stattfinden, während sie in der Elektrolysezelle von der Spannungsquelle erzwungen werden (s. Kap. 5.1). Diese Erkenntnis wird jedoch von keinem der Befragten bei der Beschriftung der Elektroden mit 'Pluspol' und 'Minuspole' berücksichtigt. Bei keinem der Schüler, die einen Perspektivenwechsel der hier beschriebenen Art vollziehen, fällt dieser mit dem Wechsel zwischen der galvanischen Zelle und der Elektrolysezelle zusammen.

S1, S3, S7, S8, S9 und S10 benutzten im gesamten Interview nur eine der beiden Perspektiven.

S1⁸⁴, S3, S7, S8 und S9 gehen immer davon aus, daß die Ladungen die Ursache des Stromflusses sind.

S10 sieht im Elektronenfluß immer die Ursache für die Ladungen in der Zelle.

S2, S4 und S6 benutzen beide Perspektiven (s. Kap. 5.6.1, Seite 148).

5.7.1.3 Betrachtung der Elektrode aus Sicht des inneren Stromkreises ↔ des äußeren Stromkreises (dynamische Betrachtung)

Eine Elektrode, die beispielsweise Elektronen an den äußeren Stromkreis abgibt, kann deshalb aus Sicht des äußeren Stromkreises als negativ angesehen werden⁸⁵. Man kann jedoch davon ausgehen, daß in einer Elektrode, die Elektronen abgibt, positive Teilchen zurückbleiben. Aus Sicht des inneren Stromkreises ist die Elektrode entsprechend positiv. Sie zieht negativ geladene Teilchen an (s. Kap.5.6.1).

S3 stellt bei der galvanischen Zelle fest, daß die Elektrode, die Elektronen an den äußeren Stromkreis abgibt – und die er daher als negativ ansieht⁸⁵ – gleichzeitig Elektronen vom inneren Stromkreis aufnimmt. Aus Sicht des in-

⁸⁴ Das bezieht sich bei S1 nur auf den inneren Stromkreis (s. Kap. 5.3.2.3).

neren Stromkreises müßte sie folglich positiv sein⁸⁵. Der Schüler versucht diesen Widerspruch aufzulösen, indem er die chemische Reaktion betrachtet. Die Elektrode gibt positive Ionen an die Lösung ab. Grund dafür ist die chemische Reaktion ($M \rightarrow M^{2+} + 2e^-$). So entsteht eine Schicht von positiven Ionen um die Elektrode herum. Diese macht die Elektrode für den inneren Stromkreis positiv.

[S3:] Ich habe einfach gedacht, wenn die Elektronen rein gehen [innerer Stromkreis], muß ... die Elektrode [Zinkelektrode] positiv sein [Stimme klingt fragend]. Das heißt, das außen rum [äußerer Stromkreis] müßte negativ sein. [0:06 – Skizze 1]

[S3:] Wenn man sich das jetzt so räumlich vorstellen würde, dann wären ja um die Zinkelektrode überall positive Zinkionen, [sie] wäre positiv. [...] Aber in der Zinkelektrode sind ja Elektronen, die auf die andere Seite gehen, so hochgehen. [1:01 – Skizze 1]

[S3:] Wenn ich von dieser Definition [Pluspol: es müssen Elektronen aufgenommen werden] ausgehe, kann ich sagen, daß an der Zinkelektrode zwei Elektronen frei werden, durch die Reaktion von Zink null solid wird zu Zink 2+ aq plus zwei Elektronen. Diese Elektronen werden von der Zinkelektrode im Prinzip [...] absorbiert. Wie so ein Pluspol auch Elektronen haben will, werden die jetzt vom Zink absorbiert und weitergeleitet. [...] Und zusätzlich durch diese Definition, daß hier Zink 2+ Ionen sich drum herum anlagern, kann ich sagen, [...] dort ist der Pluspol. [0:49 – Skizze 1]

Das erinnert stark an einen Wechsel zu der Perspektive, daß die Elektrode positiv wird, weil sie Elektronen abgibt. Diesen Schritt vollzieht der Schüler jedoch nicht. Das Argument des Schülers ist ja gerade, daß die Elektrode Elektronen vom inneren Stromkreis aufnehmen kann, weil sie – von dieser Seite betrachtet – positiv ist.

S4 stellt sich eine positive Schicht von Ionen an der negativen Elektrode vor, um erklären zu können, warum sich in der Lösung negative Teilchen auf sie zu bewegen (s. Kap. 5.4.3).

Bei S6 ist das anders. Er nimmt die Ladung der Elektrode abwechselnd als Ursache für den oder als Wirkung des Elektronenflusses an. Die Feststellung, daß die Elektrode, die Elektronen an den äußeren Stromkreis abgibt, positiv ist, hängt hier eng damit zusammen, daß an der Elektrode positive Ionen zurückbleiben.

⁸⁵ Dabei wird die Ladung als Ursache des Elektronenflusses angesehen (s. Kap. 5.7.1.2).

[I:] **Kannst du noch mal beschreiben, wie du die Entscheidung getroffen hast, welche Elektrode positiv und negativ ist?**

[S6:] Ich bin dabei vom Zink ausgegangen und habe mir [...] unten die Reaktionsgleichung noch mal angeschaut. Und halt festgestellt, daß hier [...] zwei Elektronen sozusagen abgegeben werden. Und das ein Überschuß an – nicht unbedingt ein Überschuß, aber halt die Teilchen, die Elektronen abgeben halt als 2+ ausfallen, [als] Zink 2+ .. und deswegen [ist die Elektrode] positiv. [0:12 – Skizze 1]

[S6:] Ein positiver Pol kann keine Elektronen abgeben. Er würde sie ja anziehen durch die Ungleichpoligkeit.

[I:] **Kannst du das mal vergleichen, mit der Argumentation, die du vorher hattest?**

[S6:] Vorher hatte ich argumentiert mit den Ionen, die da als Überschuß vorhanden sind und somit sozusagen den positiven Pol bilden. .. [Dabei] hatte ich mich nur an den Ionen orientiert. Und jetzt orientiere ich mich an dem Elektronenfluß. Und der Elektronenfluß ist ja eigentlich das entscheidende hier bei [...] solchen Versuchen. Von wo nach wo eigentlich im Endeffekt die Elektronen fließen. Weil ich ja sehe: welcher Stoff gibt dann die Elektronen ab und welcher nimmt ihn auf. Falsch war es am Anfang, mich an diesen Ionen zu orientieren. [0:54 – Skizze 1]

5.7.1.4 *Elektronenaustausch zwischen der Elektrode und dem inneren Stromkreis ↔ dem äußeren Stromkreis (dynamische Betrachtung)*

Zur Beschreibung eines Elektronentransfers an Elektroden werden oft die Begriffe 'Elektronenabgabe' und 'Elektronenaufnahme' verwendet. Damit die Begriffe 'Aufnahme' und 'Abgabe' eindeutig sind, muß klar sein, wer abgibt und wer aufnimmt. Mit einer Aufnahme geht immer auch eine Abgabe einher⁸⁶. Da die Aussagen der Schüler diese Zusatzinformationen meistens nicht explizit enthalten, ist es nicht immer leicht, sie zu verstehen.

Die Aussage, daß an einer Elektrode einen Elektronenabgabe stattfindet, kann bedeuten, daß diese Elektronen an den inneren Stromkreis abgegeben werden. Es kann aber auch das Gegenteil gemeint sein: Elektronen werden an den äußeren Stromkreis abgegeben.

Im Gespräch geht S1 davon aus, daß die Elektroden Elektronen nur mit dem inneren Stromkreis austauschen. Das hängt mit der strikten Trennung zwischen innerem und äußerem Stromkreis zusammen. Im inneren Stromkreis argumentiert der Schüler 'chemisch', im äußeren 'physikalisch' (s. Kap. 5.3.2.3).

⁸⁶ Daher kann es keine Reduktion ohne gleichzeitige Oxidation geben.

S3 definiert die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' über die Begriffe 'Elektronenaufnahme' und 'Elektronenabgabe'. Dabei benutzt er die Begriffe 'Aufnahme' und 'Abgabe' unterschiedlich.

Bei der galvanischen Zelle beschreibt er einen Elektronenaustausch zwischen der Elektrode und dem äußeren Stromkreis, bei der Elektrolyse einen Elektronenaustausch zwischen der Elektrode und dem inneren Stromkreis.

[I:] **Du hast in der ersten Zeichnung noch Kathode / Anode eingezeichnet. Kannst du das in der zweiten auch machen?**

[S3:] [Schreibt in Skizze 2: Zinkelektrode = Kathode, Kupferelektrode = Anode] Jetzt kommt die Frage: Warum ist das jetzt hier umgekehrt oder nicht umgekehrt? Liege ich richtig?

[I:] **Ja.**

[S3:] Kathode da wo Elektronen sind. Anode da, wo Elektronen aufgenommen werden. Also noch mal: *Kathode, wo abgegeben werden; Anode, wo aufgenommen werden.* [Austausch zwischen Elektrode und innerem Stromkreis – Skizze 2]

Bei der Galvanolyse [ein] bißchen komplizierter: [...] um die Elektrode sammelt sich ja dieses Zink $2+$ [...]. Wenn man das sich jetzt so räumlich vorstellen würde, dann wären ja um die Zinkelektrode überall positive Zinkionen. [Die] wäre also positiv [und müßte eigentlich Elektronen aufnehmen]. [...] Deswegen auch die Bezeichnung. *Aber in der Zinkelektrode sind ja Elektronen, die auf die andere Seite gehen. So hochgehen. Ja deswegen Kathode, weil da Elektronen sind und auf der anderen, die abgegeben werden* [an den äußeren Stromkreis – Skizze 1] [1:00 – Skizze 1 & 2]

5.7.1.5 *Die Aussage, daß Elektronen abgegeben / aufgenommen werden, bezieht sich auf einzelne Teilchen \leftrightarrow auf die Elektrode als Ganzes (dynamische Betrachtung)*

Die Feststellung, daß an einer Elektrode Elektronen aufgenommen bzw. abgegeben werden, läßt bei ihrer Interpretation noch einen weiteren Freiheitsgrad zu. Es kann die Elektrode als Ganzes sein, die beispielsweise Elektronen aufnimmt, es können aber auch einzelne Teilchen sein, die sich an der Elektrode befinden und Elektronen aufnehmen.

[S3:] An der Kupferelektrode [...] werden ja Elektronen frei, die ich vorher von der Zinkelektrode bekommen habe.

Die werden ja jetzt *abgegeben* [auf die Elektrode bezogen]. Und zwar in der Reaktion, daß positive Teilchen diese Elektronen *aufnehmen* [auf Teilchen bezogen] und zu neutralen Teilchen werden. Und aufgrund dieser *Abgabe* habe ich die Definition des Minuspol gewählt. [0:50 – Skizze 1]

S3 bezieht die Begriffe 'Aufnahme' und 'Abgabe' bei der Definition der Begriffe 'Anode', 'Kathode', 'Pluspol' und 'Minuspol' auf die Elektrode als Ganzes.

So ist mit der Verknüpfung der Begriffe 'Anode' und 'Elektronenaufnahme' gemeint, daß die Elektrode als Ganzes Elektronen aufnimmt⁸⁷.

Der Schüler verknüpft außerdem den Begriff 'Elektronenaufnahme' mit dem Begriff 'Reduktion' und den Begriff 'Elektronenabgabe' mit dem Begriff 'Oxidation'. In diesen Fällen bezieht er die Begriffe 'Aufnahme' und 'Abgabe' jedoch auf einzelne Teilchen und nicht auf die Elektrode als Ganzes. Das heißt zum Beispiel, daß, wenn an einer Elektrode eine Reduktion stattfindet, das Teilchen, welches reduziert wird, Elektronen aufnimmt⁸⁸.

[S3:] Das solide Kupfer *gibt* zwei Elektronen *ab* und wird zu Kupfer 2+. [...] [Die Elektrode] nenne ich als Pluspol, weil dort die Elektronen *genommen* werden [auf die Elektrode bezogen] und weitergeleitet werden. [0:54 – Skizze 2]

[S3:] Und auf der anderen Seite oxidiert. Die Ladungszahl wird ja zu 2+, es werden zwei Elektronen *abgegeben* [auf Teilchen bezogen]. [1:04 – Skizze 2]

S3 wechselt während des Interviews häufig die Perspektive. Er ist sich dessen immer bewußt, und es bereitet ihm keine Schwierigkeiten. Das einzige Problem ist, daß es durch die Perspektivenwechsel schwierig ist, ihm zu folgen. Das häufige, unangekündigte Wechseln der Perspektive stellt hier ein Kommunikationsproblem dar.

5.7.1.6 Die Aussage, daß Elektronen vom Minuspol zum Pluspol fließen, wird auf unterschiedliche Punkte des Stromkreises bezogen

Wenn man aus der Richtung des Elektronenflusses im äußeren Stromkreis der Elektrolysezelle auf die Polung der Elektroden und der Anschlüsse der Spannungsquelle schließen will, so hat man unter Umständen zwei Möglichkeiten. Das ist dann der Fall, wenn man zum einen davon ausgeht, daß der Pluspol der Quelle mit der positiven Elektrode und der Minuspol der Quelle mit der nega-

⁸⁷ In der Wissenschaftssprache ist es hingegen üblich, daß der Begriff 'Elektronenaufnahme' in diesem Zusammenhang auf einzelne Teilchen und nicht auf die Elektrode bezogen wird.

⁸⁸ Dies entspricht der wissenschaftlichen Definition des Begriffes 'Reduktion'. Bezöge man den Begriff 'Elektronenaufnahme' auf die Elektrode, so wäre die Aussage 'Reduktion ist Elektronenaufnahme' aus wissenschaftlicher Sicht falsch.

tiven Elektrode verbunden ist⁸⁹ und zum anderen nicht berücksichtigt, daß die Stromquelle die Richtung des Elektronenflusses vorgibt.

S8 geht immer davon aus, daß Elektronen vom Minuspol zum Pluspol fließen. Zunächst nimmt er die Elektroden als Ausgangspunkte seiner Überlegungen und kommt so zu dem Schluß, daß Elektronen von der negativen Elektrode zum negativen Anschluß der Spannungsquelle und vom positiven Anschluß der Spannungsquelle zur positiven Elektrode fließen.

Der Interviewer bringt den Schüler dazu, seine Perspektive zu wechseln und die Anschlüsse der Spannungsquelle als Ausgangspunkte seiner Überlegung zu nehmen. Um das zu erreichen, zeichnet der Interviewer einen Stromkreis auf, der nur eine Lampe und eine Spannungsquelle enthält. Er gibt die Richtung des Elektronenflusses vor und bittet den Schüler, die Anschlüsse der Quelle mit 'Plus' und 'Minus' zu beschriften. Zunächst beschriftet der Schüler den Stromkreis so, daß Elektronen vom Pluspol der Quelle über die Lampe zum Minuspol der Quelle fließen. Dabei ist die Lampe der Ausgangspunkt seiner Überlegungen. Der Schüler ändert diese Beschriftung nach kurzer Zeit von selbst, in derart, daß Elektronen vom Minuspol zum Pluspol der Spannungsquelle fließen. Als der Interviewer den Schüler bittet, dies mit der Elektrolysezelle zu vergleichen, ändert dieser die Beschriftung der Zelle mit 'Plus' und 'Minus' derart, daß die Elektronen vom Minuspol der Spannungsquelle zur negativen Elektrode und von der positiven Elektrode zum Pluspol der Spannungsquelle fließen. Nun ist die Quelle der Ausgangspunkt seiner Überlegungen.

[I:] [...] Ich male mal so ein Teil. .. [Skizze 3 / Schaltung und Richtung des Elektronenflusses aber nicht "+" und "-"] .. Also angenommen, ich mache so einen Aufbau, wo ich hier die Stromquelle habe und hier die Birne dran. Und ich würde jetzt sagen, daß die Elektronen so fließen. Kannst du dann hier die beschriften [mit] Plus- und Minuspol?

[S8:] Ja, ich glaube, dann wäre hier Minus [Skizze 3 / oben (durchgestrichene Beschriftung)] und hier Plus [Skizze 3 / unten (durchgestrichene Beschriftung)]. Weil [...] am Minuspol [er zeigt auf die Lampe] ja immer die Oxidation [stattfindet]. Hier werden ja so Elek~ Hö? [erstaunt] ...Ach so! .. [Da ist] ein Trick dabei. Ja eigentlich mh.. Ja, dann wäre hier. Hier wäre Minus [Skizze 3 / unten (Beschriftung)] und hier wäre Plus [Skizze 3 / oben (Beschriftung)]. Weil, hier werden ja die Elektronen abgegeben [Skizze 3 / unten] und die kommen ja zum Pluspol hin. [Skizze 3 / oben] Ja, so.

⁸⁹ Davon gehen nicht alle Schüler aus (s. Kap. 5.6.1.1).

[I:] **Kannst du das mal mit dieser Zeichnung [Skizze 2] vergleichen? Hier.**

[S8:] Mh, da habe ich das glaube ich mh, da weiß ich nicht. Habe ich das anders rum jetzt da gemacht? [0:56 – Skizze 2 & 3]

5.7.2 Einige Ursachen für das Wechseln der Perspektive

In einigen Fällen ist es nachvollziehbar, warum ein Schüler im Verlauf des Gesprächs die Perspektive wechselt. Diese Fälle werden im folgenden beschrieben.

5.7.2.1 Die Beschreibung einer zeitlichen Abfolge führt zum Perspektivenwechsel

In Kap. 5.3.2.1 wurde beschrieben, daß S2, S4 und S10 die Vorgänge als zeitliche Abfolge beschreiben. Das hängt mit der aus der Physikdidaktik bekannten *lokalen Argumentation* bei der Beschreibung von elektrischen Stromkreisen zusammen. Diese führt bei S2 und S4 zu einem Perspektivenwechsel. Bei S10 ist das nicht der Fall. Er geht davon aus, daß die Vorgänge in der Zelle eigentlich alle gleichzeitig stattfinden und daß es sich bei der beschriebenen zeitlichen Abfolge nicht um die tatsächlichen Vorgänge handelt.

Wenn man eine zeitliche Sequenz beschreibt, so führt das unweigerlich dazu, daß man die Ladung eines Bestandteiles der Zelle abwechselnd als Ursache für den Stromfluß und als Wirkung des Stromflusses auffaßt (s. Kap. 5.7.1.2). Das soll nun anhand einer der Beschreibungen von S2 verdeutlicht werden (s. Tabelle 14 – Beispiel 4, Seite 96).

S2 sagt, daß die Zinkelektrode vom Minuspol der Quelle Elektronen erhält und dadurch negativ geladen wird. Um wieder neutral zu werden, nimmt die Elektrode positive Teilchen von der Zinksulfatlösung auf, die dadurch ihrerseits negativ wird und – im nächsten Schritt der Abfolge – positive Teilchen von der Kupfersulfatlösung erhält. Danach ist die Zinksulfatlösung neutral und die Kupfersulfatlösung negativ. Daher erhält die Kupfersulfatlösung positive Teilchen von der Kupferelektrode. Die nunmehr negative Kupferelektrode gibt Elektronen an den Pluspol der Quelle ab und wird wieder neutral.

Der vom Schüler vollzogene Perspektivenwechsel wird deutlich, wenn man sich einen Teil der Zelle herausnimmt. Jeder Teil der Zelle ist an zwei der zeitlich nacheinander ablaufenden Teilschritten der Abfolge beteiligt. So gibt beispielsweise die neutrale Zinksulfatlösung zunächst positive Teilchen an die Zinkelektrode ab und wird dabei negativ geladen. Hier ist der Ladungsfluß die Ursache für die Ladung der Lösung. Im nächsten Teilschritt wird die Ladung Ursache des Transportvorganges sein. Die Zinksulfatlösung nimmt positive Teilchen von der Kupfersulfatlösung auf, weil sie geladen ist.

Wenn man sich nicht auf die Beschreibung eines Teiles der Zelle beschränkt, stellt sich der Vorgang etwas anders dar. Der Ladungsfluß zwischen der Zinksulfatlösung und der Kupfersulfatlösung findet – aus Sicht von S2 – statt, weil die Zinksulfatlösung negativ geladen ist und nach Neutralität strebt. So gesehen ist die Ladung immer die Ursache des Ladungstransportes.

Die Betrachtung eines bestimmten Teiles der Zelle wird dann interessant, wenn man feststellen will, welche Ladung er hat. Wie bereits in Kap. 5.3.2.1 beschrieben wurde, läßt sich, ausgehend von der Beschreibung einer zeitlichen Abfolge, keiner Elektrode eine eindeutige Ladung zuordnen. Die Ladung ist abhängig von dem – von S2 willkürlich gewählten – Startpunkt der Abfolge und der Zustand der Elektrode wechselt zwischen geladen und ungeladen. Daher orientiert sich S2 bei der Beschriftung der Zellen mit 'Pluspol' und 'Minuspole' nicht an der zeitlichen Abfolge, sondern an der Richtung des Elektronenflusses im äußeren Stromkreis⁹⁰.

[I:] **Mich interessiert auch, wie du da hinkommst, daß du das als Pluspol bezeichnest.**

[S2:] O.k., dann nenne ich erst mal. Ich habe jetzt [die] Zinkkathode als Pluspol [und die] Kupferkathode als Minuspole. ... Ja, die Feldlinien, also die Elektronen wandern ja immer von Plus nach Minus [...]. Also jetzt habe ich ja gesagt, daß die von Zink Richtung Kupferkathode wandern – die Elektronen – und die lädt sich ja negativ auf. Also ist das mein Minuspole. Und da hier [...] bei der Zinkkathode Elektronen verloren gehen ist die positiv, also ist das mein Pluspol. [...] Auf jeden Fall wandern Elektronen. [Es] müssen ja Elektronen wandern, beim Stromkreis oben rüber bei der Lampe. Also ob jetzt vom Zink, oder zum Kupfer oder vom Kupfer zum Zink, daß weiß ich nicht. Aber von wem sie weg wandern, das ist der Pluspol. [0:56 – Skizze 1]

⁹⁰ S2 benutzt den Begriffsnamen 'Kathode' als Synonym für den Begriff 'Elektrode'.

Eine direkte, eindeutige Verknüpfung der Polung der Elektroden mit der Richtung des Elektronenflusses ist aber nicht möglich, wenn man mal die Ladung als Ursache des Stromflusses und mal den Stromfluß als Ursache der Ladung auffaßt.

Ein anderer Perspektivenwechsel, der auftritt, wenn man eine zeitliche Sequenz beschreibt, ist der, daß eine Elektrode abwechselnd Teilchen mit dem inneren bzw. äußeren Stromkreis austauscht⁹¹ (s. Kap. 5.7.1.4).

[S4:] Und dann wird hier dieser Pol [...] immer stärker eigentlich negativ aufgeladen werden. Aber da

[I:] **Wodurch?**

[S4:] Erstmal durch die Anionen [innerer Stromkreis] und [...] die Ladungen, die würden ja einfach weitergehen, nach 'ner Zeit ist zwar für eine gewisse Zeit negativ, aber die [...] Ladung, also dieses Elektron, wird einfach weitergegeben [an den äußeren Stromkreis], um eigentlich diesen Stromkreislauf zu schließen. [0:40 – Skizze 2]

Auch S4 beschreibt keinen stationären Zustand, sondern eine zeitliche Abfolge. Wenn man das für einen Moment akzeptiert, kann man feststellen, daß Probleme auftauchen, weil er für seine Beschreibung die Perspektive nicht konsequent genug zwischen den Annahmen, daß die Ladung Ursache für bzw. Wirkung des Stromflusses ist, wechselt. Das führt zu einem Widerspruch, den er selbst bemerkt.

Zum einen stellt S4 fest, daß die Zinkelektrode der Elektrolysezelle dadurch negativ wird, daß sie Elektronen vom inneren Stromkreis aufnimmt. Hier ist der Elektronenfluß die Ursache der Ladung.

[S4:] Elektronen kommen zum Zink und [...] diese Zinkelektrode wird halt negativ geladen [0:23 – Skizze 2]

Zum anderen fragt er sich, wie es möglich ist, daß sich in der Lösung Elektronen bzw. negative Anionen, die die Elektronen transportieren (s. Kap. 5.4.2.1), auf die negative Zinkelektrode zu bewegen.

⁹¹ Dieser Perspektivenwechsel ist ganz allgemein bei der Beschreibung eines Stromkreises notwendig.

[S4:] [...] sehe ich da Schwierigkeiten, wie dieses Ion wandern würde. Also ich würde das jetzt erst mal so machen, daß [...] ich das trotzdem mal einfach [so beschreibe], obwohl das eigentlich unmöglich ist, daß [...] hier plötzlich ein Elektron eigentlich zum negativen Pol wandert. [...] Im Prinzip wird [...] durch die Anlagerung [...] dieses Ganze [die Elektrode] im Prinzip negativ geladen. [0:38 – Skizze 2]

S4 sagt zwar, daß die Elektrode durch die Anlagerung der Elektronen negativ wird – der Elektronenfluß also die Ursache für die Ladung ist –, er löst sich aber nicht konsequent genug von der anderen Perspektive. Er hat Schwierigkeiten damit, daß negative Teilchen sich auf die negative Elektrode zu bewegen, weil er die Ladung gleichzeitig als Ursache für den Elektronenfluß auffaßt. Dabei muß man beachten, daß der Schüler eine zeitliche Abfolge und keinen stationären Zustand beschreibt. Er versucht das Problem damit zu lösen, daß er eine Schicht von positiven Ionen annimmt, welche die Elektrode umgibt und die negativen Teilchen anzieht (s. Kap. 5.4.3). Mit dieser Beschreibung ist er aber – nach eigenen Angaben – nicht zufrieden.

5.7.2.2 Die Beschreibung unterschiedlicher Prozesse führt zum Perspektivenwechsel

Bei der Beschreibung unterschiedlicher Prozesse kann es sinnvoll sein, die Perspektive zu wechseln. Das ist – aus naturwissenschaftlicher Sicht – dann der Fall, wenn man von der Betrachtung einer Galvanischen Zelle zu der Betrachtung einer Elektrolysezelle übergeht (s. Kap. 5.7.1.2).

S8 vollzieht einen Perspektivenwechsel bei der Beschreibung der Elektrolysezelle. Dabei wendet er seine Annahme, daß Elektronen vom Minuspol zum Pluspol fließen, zunächst auf die Elektroden und nach einer Intervention durch den Interviewer auf die Anschlüsse der Spannungsquelle (s. Kap. 5.7.1.6) an. Der Grund für die Verwendung der ersten Perspektive ist, daß S8 davon ausgeht, daß die Vorgänge bei der Elektrolyse 'andersherum' ablaufen als bei der galvanischen Zelle. Folglich dreht er bei der Beschriftung der Elektrolysezelle alles, was er zuvor in die galvanische Zelle eingetragen hat, um. Dabei übersieht er zunächst, daß bei der Elektrolysezelle die Spannungsquelle die Stromrichtung vorgibt. Hier wird also der – beim Übergang von der galvanischen Zelle zur Elektrolysezelle – notwendige Perspektivenwechsel nicht vollzogen: Bei Skizze 1 bewirkt die galvanische Zelle den Stromfluß, bei der Elektrolyse-

zelle gibt die Spannungsquelle die Stromrichtung vor. Das führt dazu, daß – nach der ersten Beschreibung des Schülers – Elektronen vom Pluspol der Spannungsquelle über die Zelle zum Minuspol der Quelle fließen. Durch seine Intervention bringt der Interviewer den Schüler im Endeffekt dazu, die Tatsache, daß die Spannungsquelle die Stromrichtung vorgibt, bei der Beschriftung von Skizze 2 zu berücksichtigen.

S9 benutzt bei seiner Beschreibung des Laden-Entladen-Zyklus unterschiedliche Perspektiven. Er wechselt die Perspektive, wenn er von einem *Vorgang* zu einen *Zustand* übergeht, zwischen einer dynamischen und einer statischen Betrachtung. Hier werden folglich für die Beschreibung unterschiedlicher Situationen unterschiedliche Perspektiven verwendet. Wie in Kap. 5.7.1.1 beschrieben ist, stellt nicht dieser Perspektivenwechsel, sondern das Fehlen eines anderen – notwendigen – Wechsels der Perspektive⁹² ein Problem dar.

5.7.2.3 *Auswendig gelernte Definitionen führen zum Perspektivenwechsel*

Ein Grund für den Wechsel der Perspektive kann sein, daß ein Schüler mit mehreren Definitionen für den selben Begriffsnamen operiert. Wenn sich diese Definitionen widersprechen, so kann ein solcher Widerspruch unter Umständen durch einen Perspektivenwechsel aufgelöst werden.

S3 benutzt beispielsweise drei unterschiedliche Definitionen für 'Anode' und 'Kathode'. Als Beispiel sei hier die 'Anode' gewählt. Alle Argumente sind für die 'Kathode' analog.

Die von S3 verwendeten Definitionen für 'Anode' sind:

1. Bei der Elektrolyse ist die 'Anode' der 'Pluspol', bei der galvanischen Zelle ist die 'Anode' der 'Minuspol'.
2. An der 'Anode' findet immer eine 'Elektronenaufnahme' statt.

⁹² Nämlich der Wechsel von der Betrachtung der Ladung als Ursache des Elektronenflusses zur Betrachtung der Ladung als Folge des Elektronenflusses.

3. An der 'Anode' findet immer eine 'Oxidation' statt.

Da für S3 eine 'Oxidation' immer eine 'Elektronenabgabe' ist und diese an der Anode stattfindet – die er wiederum mit einer 'Elektronenaufnahme' in Verbindung setzt –, muß der Schüler die Perspektive wechseln: Bei der Definition des Begriffes 'Anode' bezieht sich die 'Elektronenaufnahme' auf die Elektrode als Ganzes. Bei der Definition des Begriffes 'Oxidation' bezieht sich die 'Elektronenabgabe' auf einzelne Teilchen (s. Kap. 5.7.1.5). Somit ist der Widerspruch aufgelöst. Die Elektrode nimmt die Elektronen auf, die von den Teilchen, die oxidiert werden, abgegeben werden.

Da S3 immer davon ausgeht, daß der 'Pluspol' Elektronen aufnimmt und der 'Minuspol' Elektronen abgibt (s. Kap. 5.6.1), ist ein weiterer Perspektivenwechsel notwendig, damit die ersten beiden Definitionen des Begriffes 'Anode' zusammen angewendet werden können. Die 'Anode' soll demnach bei der Elektrolysezelle der 'Pluspol' und bei der galvanischen Zelle der 'Minuspol' sein. Ausgehend von der Definition, die S3 für die Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' verwendet, müßte die 'Anode' bei der einen Zelle Elektronen aufnehmen und bei der anderen Elektronen abgeben. Das steht im Widerspruch zu der Aussage, daß an der 'Anode' eine 'Elektronenaufnahme' stattfindet. Diese Problem könnte der Schüler dadurch lösen, daß er die 'Aufnahme' einmal auf die Elektrode als Ganzes und einmal auf einzelne Teilchen bezieht, wie er es bei dem anderen Widerspruch getan hat. Es gibt aber noch einen weiteren Freiheitsgrad bei der Benutzung der Begriffe 'Aufnahme' und 'Abgabe', den der Schüler hier benutzt. Der Schüler beschreibt einmal einen Elektronenaustausch zwischen der Elektrode und dem inneren Stromkreis und einmal einen Elektronenaustausch zwischen der Elektrode und dem äußeren Stromkreis (s. Kap. 5.7.1.4). Bei der galvanischen Zelle ist der 'Minuspol' negativ, weil er Elektronen an den inneren Stromkreis 'abgibt'. Gleichzeitig ist der 'Minuspol' die 'Anode', weil er Elektronen vom äußeren Stromkreis 'aufnimmt'. Bei der Elektrolysezelle ist der 'Pluspol' die 'Anode'. Beides läßt sich – in diesem Fall – damit begründen, daß er Elektronen vom inneren Stromkreis 'aufnimmt'.

Es macht den Anschein, daß S3 die unterschiedlichen Definitionen auswendig gelernt hat und diese nicht anzweifelt. Um dennoch zu einer widerspruchsfreien Beschreibung der beiden Zelltypen zu kommen, muß er die Begriffe

'Abgabe' und 'Aufnahme', die er in seinen Definitionen benutzt, unterschiedlich verwenden. Folglich muß er die Perspektive wechseln, wenn er keine seiner Definitionen in Frage stellen will.

5.7.3 Diskussion

MAROHN (1999) stellt fest, daß die Vorgänge in elektrochemischen Zellen aus unterschiedlichen Perspektiven beschrieben werden (s. Kap. 2.2). Dabei beschreibt sie die folgenden Perspektiven:

- Die Begriffe 'Aufnahme' und 'Abgabe' werden auf einzelne Teilchen oder auf eine Elektrode als Ganzes bezogen.
- Identifizierung von 'Minuspol' und 'Pluspol' ausgehend vom Elektronentransfer zwischen der Elektrode und dem inneren bzw. äußeren Stromkreis.
- Identifizierung von 'Minuspol' und 'Pluspol' ausgehend vom Elektronentransfer unter der Annahme, daß dieser die Ursache für die Ladung bzw. Folge der Ladung der Elektrode ist.

Dabei konnte MAROHN (1999) nicht feststellen, ob einzelne Schüler zwischen den Perspektiven wechseln.

Auch in den Interviews zeigt sich, daß zur Beschreibung der Zellen unterschiedliche Perspektiven verwendet werden. In Tabelle 15 werden diese Perspektiven in drei Kategorien eingeteilt. Die einzelnen Perspektiven wurden in Kapitel 5.7.1 genau beschrieben.

Alle Perspektiven der Kategorien zwei und drei entsprechen der dynamischen Betrachtung aus Kategorie eins. Es wird mit dem Strombegriff argumentiert.

In der zweiten Kategorie werden die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' mit dem Strombegriff verknüpft. Das dies aus naturwissenschaftlicher Sicht falsch ist, wurde bereits in Kap. 5.6.4.1 (Stellungnahme 18) festgestellt. Die Begriffe verlieren dadurch ihre Eindeutigkeit. Die Verknüpfung ist aus Sicht der Schüler möglich, weil sie keinen stationären Zustand beschreiben (s. Kap. 5.3.3, Stellungnahme 4 und 5.6.4.1, Stellungnahme 19). Hier zeigt sich, daß die *lokale Argumentation* und die mit ihr zusammenhängende Beschreibung eines

Startvorgangs für die Freiheitsgrade bei der Definition der Begriffe verantwortlich sind.

Bei den Perspektiven der dritten Kategorie zeigt sich, daß die Begriffe 'Aufnahme' und 'Abgabe' nicht eindeutig sind, wenn nicht dazu gesagt wird, welcher Bestandteil der Zelle abgibt und an welchen anderen Teil abgegeben wird. Die Schüler verwenden die Begriffe 'Elektronenaufnahme' und 'Elektronenabgabe' für die Definition der Begriffspaare 'Minuspol', 'Pluspol' und 'Anode', 'Kathode'. Dadurch können diese Begriffe ihre Eindeutigkeit verlieren.

1. Identifizierung von 'Minuspol' und 'Pluspol'

dynamische Betrachtung: Entscheidung ausgehend von der Flußrichtung geladener Teilchen	statische Betrachtung: Entscheidung ausgehend von einem Vergleich der Anzahl von positiven und negativen Teilchen in der Elektrode
---	---

2. Verknüpfung der Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' mit der Richtung des elektrischen Stromflusses (dynamische Betrachtung)

Die Ladung ist Ursache für den Elektronenfluß	Der Elektronenfluß ist Ursache für die Ladung
Betrachtung der Elektrode aus Sicht des inneren Stromkreises	Betrachtung der Elektrode aus Sicht des äußeren Stromkreises
Die Annahme, daß Elektronen immer vom Minuspol zum Pluspol fließen wird bei der Elektrolysezelle auf die Elektroden bezogen	Die Annahme, daß Elektronen immer vom Minuspol zum Pluspol fließen, wird bei der Elektrolysezelle auf die Anschlüsse der Spannungsquelle bezogen

3. Beschreibung eines Elektronentransfers mit den Begriffen 'Elektronenaufnahme' und 'Elektronenabgabe' (dynamische Betrachtung)

Elektronenaustausch zwischen der Elektrode und dem inneren Stromkreis	Elektronenaustausch zwischen der Elektrode und dem äußeren Stromkreis
'Aufnahme' bzw. 'Abgabe' bezogen auf einzelne Teilchen	'Aufnahme' bzw. 'Abgabe' bezogen auf eine Elektrode als Ganzes

Tabelle 15: Die von den Schülern im Interview verwendeten Perspektiven

Die Beschreibung einer Strömung kann ausgehend von unterschiedlichen Perspektiven erfolgen.

Werden die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' fälschlicherweise mit der Richtung des elektrischen Stroms verknüpft (s. Stellungnahme 18), so kann das auf unterschiedliche Art geschehen. Daher werden diese Begriffe von den Schülern nicht in einer eindeutigen Weise verwendet. Keiner der Schüler, die diese Verknüpfung vornehmen, beschreibt einen stationären Zustand. In so einem Zustand kann ein Stromfluß keine Veränderung der Ladungskonstellation des Systems verursachen.

Die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' sind mit der Richtung des elektrischen Stroms verknüpft. Die in Stellungnahme 21 vorgeschlagene Definition über die Begriffe 'Oxidation' und 'Reduktion' entspricht indirekt einer Definition über die Begriffe 'Aufnahme' und 'Abgabe'. Eine 'Oxidation' ist als 'Elektronenabgabe' definiert. Diese Definition ist für sich allein noch nicht eindeutig. Es muß zusätzlich klargestellt werden, daß die Teilchen, die oxidiert werden, Elektronen an die Elektrode abgeben⁹³.

Stellungnahme 28: Strömungen können aus unterschiedlichen Perspektiven beschrieben werden.

In den Interviews wechseln einige Schüler zwischen unterschiedlichen Perspektiven. Dabei zeigt sich, daß den Schülern klar ist, aus welchem Blickwinkel sie das System gerade betrachten. Oft stellt die Möglichkeit, unterschiedliche Perspektiven zu verwenden, jedoch ein Kommunikationsproblem dar, weil der Empfänger nicht immer weiß, welche Perspektive der Sender verwendet. Die Aussagen der Schüler enthalten meist keine Angaben über die verwendete Perspektive⁹⁴. Die Kommunikation ist dann besonders schwierig, wenn der Schüler die Perspektive oft wechselt. In diesem Fall ist es nicht immer leicht, nachzuvollziehen, welchen Blickwinkel er gerade verwendet.

⁹³ Diese Feststellung wird auch von MAROHN (1999, Seite 151) getroffen.

⁹⁴ Das ist auch in der Naturwissenschaftssprache nicht üblich.

Die Tatsache, daß die Schüler wissen, welchen Blickwinkel sie bei einer Aussage verwenden, bedeutet nicht, daß ihnen bewußt ist, daß sie die Perspektive innerhalb des Gespräches wechseln. So gibt es in den Interviews keine Hinweise darauf, daß die Schüler bemerken, daß sie die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' auf mehrdeutige Art verwenden.

In einigen Fällen läßt sich eine Systematik hinter den Perspektivenwechseln erkennen. So führt die Beschreibung einer *zeitlichen Abfolge* zwangsläufig dazu, daß zwischen unterschiedlichen Perspektiven gewechselt wird (s. Kap. 5.7.2.1). Hier resultiert der Wechsel der Perspektive aus der *lokalen Argumentation* der Schüler (s. Kap. 2.3.5). Einige Schüler benutzen bei der Beschreibung unterschiedlicher Prozesse unterschiedliche Perspektiven (s. Kap. 5.7.2.2). Einen weiteren Grund für einen Perspektivenwechsel stellen auswendig gelernte, widersprüchliche Begriffsdefinitionen dar (S3). Dadurch, daß dieser Schüler die in den Definitionen verwendeten Begriffe 'Aufnahme' und 'Abgabe' ausgehend von unterschiedlichen Perspektiven deutet, löst er die im Gespräch auftretenden Widersprüche auf (s. Kap. 5.7.2.3).

Aus den Beschreibungen der Schüler resultiert oft die Notwendigkeit von Perspektivenwechseln innerhalb der Argumentationsketten. Das heißt nicht, daß diese Perspektivenwechsel aus naturwissenschaftlicher Sicht korrekt sind. Sie sind lediglich notwendig, damit die Beschreibungen in sich konsistent sind. Gerade wurde beschrieben, daß Schüler in solchen Fällen die Perspektive wechseln. In den Interviews tauchten jedoch auch Probleme auf, weil die Schüler innerhalb ihrer Beschreibung notwendige Perspektivenwechsel nicht vollziehen. Das ist beispielsweise im Interview mit S9 der Fall. Bei dem von ihm beschriebenen Laden-Entladen-Zyklus resultiert die Ladung der Elektrode beim Ladungsvorgang aus dem Stromfluß. Der Schüler geht aber bei der Verwendung der Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' immer davon aus, daß die Ladung die Ursache des Stromflusses ist. Daher wechselt er beim Übergang vom Ladevorgang zum geladenen Zustand das Vorzeichen der Ladung der Elektrode (s. Kap. 5.7.1.1). Ein anders Beispiel stellt die Beschreibung einer zeitlichen Abfolge durch S4 dar. Er hat Probleme damit, daß sich negative Teilchen auf die negative Elektrode zu bewegen, weil er nicht beachtet, daß die Elektrode in seiner Beschreibung erst durch diese Teilchen negativ wird (s. Kap. 5.7.2.1).

Auch in einer aus naturwissenschaftlicher Sicht korrekten Beschreibung kann ein Perspektivenwechsel sinnvoll sein. So wird in Kapitel 5.2.4 (Stellungnahme 3) ein Perspektivenwechsel vorgeschlagen, um verständlich zu machen, warum beispielsweise die Oxidation bei der galvanischen Zelle am Minuspol und bei der Elektrolysezelle am Pluspol stattfindet. Dort wird empfohlen, bei der galvanischen Zelle die chemische Reaktion als Grund für die Aufrechterhaltung der Ladung und bei der Elektrolysezelle die Ladung als Ursache der chemischen Reaktion anzusehen. Ein solcher Perspektivenwechsel wird von keinem der Schüler in den Interviews vollzogen. Einige Schüler wechseln zwischen dem Blickwinkel, daß die Ladung die Ursache für den Elektronenfluß ist, und dem, daß der Elektronenfluß die Ursache für die Ladung ist. Dieser Perspektivenwechsel ist dem in Stellungnahme 3 vorgeschlagenen ähnlich, ist aber für einen stationären Zustand nicht sinnvoll. Außerdem fällt dieser Wechsel bei keinem der Schüler, die diese beiden Perspektiven verwenden, mit dem Übergang von einer galvanischen Zelle zu einer Elektrolysezelle zusammen. Jeder dieser Schüler nimmt hingegen an, daß die Vorgänge in der galvanischen Zelle von allein ablaufen und bei der Elektrolysezelle durch die Quelle verursacht werden. Das wird beim Umgang mit den Begriffen 'Minuspol' und 'Pluspol' nicht berücksichtigt.

Die hier beschriebenen Perspektivenwechsel stellen ein Kommunikationsproblem dar. Der Empfänger weiß nicht immer, welche Perspektive der Sender einer Botschaft verwendet.

Die Beschreibungen der Schüler machen oft Perspektivenwechsel innerhalb der Argumentationskette notwendig. So ist es beispielsweise bei der Beschreibung einer zeitlichen Abfolge erforderlich, zwischen unterschiedlichen Perspektiven zu wechseln.

In einigen Fällen treten Probleme auf, weil eine Perspektive beibehalten wird, obwohl die vom Schüler gewählte Beschreibung einen Perspektivenwechsel nötig macht.

Auch in einer aus naturwissenschaftlicher Sicht richtigen Beschreibung kann es sinnvoll sein, einen Perspektivenwechsel zu vollziehen (s. Stellungnahme 3).

Stellungnahme 29: Perspektivenwechsel stellen ein Kommunikationsproblem dar, sind aber nicht immer vermeidbar

5.8 Probleme aufgrund der gestellten Aufgabe

Bei den Interviews treten Probleme auf, die aus der Aufgabenstellung resultieren. Zum einen sind nicht alle Schüler mit der in Skizze 2 gewählten Darstellung der Spannungsquelle vertraut (Kap. 5.8.1). Zum anderen sind einige Schüler gewohnt, daß bei einer Elektrolyse kein Diaphragma verwendet wird (Kap. 5.8.2).

5.8.1 Die Darstellung der Quelle

In Skizze 2 wurde die Spannungsquelle mit dem in Abbildung 11 oben abgebildeten Schaltzeichen dargestellt. Diese Darstellung wurde gewählt, weil in ihr keine Information über die Polung der Quelle enthalten ist. Dies wäre bei einem anderen, in der Schule gebräuchlichen, Schaltzeichen der Fall. Bei dem in Abbildung 11 unten dargestellten Symbol steht der kürzere der beiden vertikalen Striche für den Minuspol.

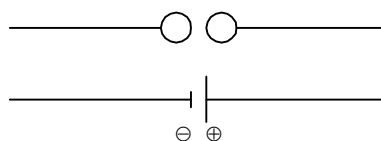


Abbildung 11: Zwei unterschiedliche Schaltzeichen für eine Spannungsquelle

Auf eine Beschriftung des Schaltzeichens mit 'Spannungsquelle' wurde aus zwei Gründen verzichtet. Zum einen ist es Teil der vom Interviewer gestellten Aufgabe, herauszufinden, daß es eine Spannungsquelle ist, die die Umkehrung der Reaktionen bewirkt. Zum anderen wurde erwartet, daß Schüler, die mit dem Strombegriff argumentieren, die Quelle als 'Stromquelle' bezeichnen würden⁹⁵. Den Schülern sollte daher kein Begriff vorgegeben werden.

Einige Schüler haben Probleme mit dem für sie ungewohnten Schaltzeichen in Skizze 2.

⁹⁵ Normalerweise wird im Chemieunterricht keine Stromquelle, sondern eine Spannungsquelle verwendet. Eine Spannungsquelle ist eine Quelle, die eine konstante Spannung liefert, während eine Stromquelle einen konstanten Strom liefert.

S3 erkennt sofort, daß es sich um eine Spannungsquelle handelt, stößt sich aber an deren Darstellung.

[S3:] Da wäre schon mal erstmal die Frage, was ist das? Wenn das eine Spannungsquelle sein sollte, kann man die nicht so einzeichnen. [0:16 – Skizze 2]

Er sagt, daß er die beiden Punkte als unterbrochenen Stromkreis gedeutet hätte, wenn die Reaktionsgleichungen nicht vorgegeben wären.

[S3:] Zu beschriften wäre da die Gleichspannungsquelle, nach den Reaktionen, die ablaufen, muß eine vorliegen. Weil natürlich, wenn man die Reaktion abdecken würde oder nicht zeigen würde, dann wäre es auch verständlich, wenn [...] dort zwei Punkte wären, die keine Gleichspannungsquelle [darstellen] so wäre noch kein geschlossener Kreislauf [vorhanden]. [0:18 – Skizze 2]

Auch S6 weiß, daß es sich bei dem Schaltsymbol um eine Quelle handelt, die er als "Gleichstrom" bezeichnet. Er hat jedoch das Problem, daß er sich nicht viel unter einer Quelle vorstellen kann. Er schließt aus dem Schaltsymbol, daß der Stromkreis unterbrochen ist.

[S6:] Aber dabei habe ich das Problem, daß eigentlich gar kein geschlossenes System da ist. Und ich weiß auch nicht allzuviel mit dem Gleichstrom anzufangen. Was der nun bewirken soll. [0:19 – Skizze 2]

S6 meint, daß der Stromkreis geschlossen sein muß. Später, als er feststellt, daß durch den inneren Stromkreis keine Elektronen gelangen können, geht er davon aus, daß ein Stromkreis auch ohne eine wirkliche Verbindung geschlossen sein kann (s. Kap. 5.3.2.2). Diese Vorstellung wendet er auch auf die Quelle in Skizze 2 an.

S9 erkennt das Schaltsymbol in Skizze 2 nicht als Spannungsquelle. Für ihn wird die Lampe aus Skizze 1 durch zwei Kontakte ersetzt, die nicht miteinander verbunden sind.

[S9:] Das ist also der gleiche Aufbau wie bei der Zeichnung davor auch. Bloß, daß die Lampe eben durch zwei Kontakte ersetzt ist, die nicht verbunden sind. [0:16 – Skizze 2a]

Er beschreibt dann eine Zelle, durch die kein Strom fließt (s. Anhang: S9 – Skizze 2a), bis der Interviewer eingreift, indem er darauf aufmerksam macht, daß das Schaltzeichen für eine Spannungsquelle steht. Danach ordnet der

Schüler, der einen Laden-Entladen-Zyklus beschreibt (s. Kap. 5.1.3), die Skizze 2 dem Ladevorgang zu (s. Anhang: S9 – Skizze 2b).

- [S9:] Und solange die Kontakte nicht geschlossen sind, braucht man da nicht mehr dran [zu] schreiben.
- [I:] **Ich habe hier so eine Abkürzung verwendet, die – wo mir auch klar war, daß die vielleicht nicht alle kennen. [...] Das sieht wirklich aus, wie zwei Kontakte, die nicht geschlossen sind. Es soll aber für eine Spannungsquelle stehen.**
- [S9:] Ach so, ja.
- [I:] **Was du nicht wissen kannst – ganz klar.**
- [S9:] Ja.
- [I:] **Wenn du das mal annimmst, daß das da eine Spannungsquelle ist.**
- [S9:] Ja, dann ist das – dieser zweite Fall, den wir vorhin hatten, das also ein Strom angelegt wird. [0:27 – Skizze 2a]

Auch S5 erkennt nicht, daß es sich bei dem Schaltzeichen in Skizze 2 um eine Spannungsquelle handelt. Er benutzt aber dennoch den Begriffsnamen 'Spannungsquelle'. Daher unterschätzt der Interviewer dieses Problem während des Interviews.

- [S5:] Dann ist das ganze auch über einen Draht verbunden, allerdings nicht geschlossen, sondern mit einer Spannungsquelle. [0:06 – Skizze 2]

Der Interviewer greift nicht ein, obwohl der Schüler sagt, daß die Spannungsquelle den Stromkreis unterbricht. Der Schüler hat Probleme mit den vorgegebenen Reaktionsgleichungen in Skizze 2. Diese sind aus seiner Sicht falsch, da er eine Zelle beschreibt, in der kein Strom fließt. Der Interviewer fordert S5 auf, die Reaktionsgleichungen als richtig anzunehmen. Er will so erreichen, daß dieser die Rolle der Spannungsquelle bei der Elektrolyse erkennt. Von diesem Moment an ist der Schüler verwirrt und versucht die aus seiner Sicht widersprüchlichen Vorgaben⁹⁶ irgendwie in Einklang zu bringen. Es sind die Erfahrungen aus diesem Interview und dessen Voranalyse, die zu der oben beschriebenen Intervention im Interview mit S9 führten.

Bei der abschließenden Analyse wurde entschieden, das Interview mit S5 nicht weiter zu berücksichtigen. Grund dafür ist vor allem, daß der Schüler durch die aus seiner Sicht widersprüchlichen Angaben verwirrt war. Es ist daher zweifel-

haft, ob das Interview die Vorstellungen des Schülers über Elektrochemie widerspiegelt. Außerdem beschreibt S5 keine Elektrolysezelle, was die Vergleichbarkeit diese Interviews mit den anderen beeinträchtigt.

5.8.2 Der ungewöhnliche Aufbau der Elektrolysezelle

Der Aufbau der Elektrolysezelle in Skizze 2 ist ungewöhnlich (s. Kap. 4.2.1). Das bereitet einigen Schülern Probleme. Diese Probleme konnten aber in allen Fällen innerhalb des Gespräches ausgeräumt werden. In einigen Fällen hat der ungewöhnliche Aufbau zur Folge, daß Schüler, die sich fragen, ob Skizze 2 eine Elektrolyse darstellt, *kritische Attribute* für den Begriff 'Elektrolyse' angeben (s. Kap. 5.6.4.3).

S3 sieht die Elektrolyse als Normalfall an, dessen Umkehrung die galvanische Zelle ist. Er beschreibt einen Leitungsmechanismus, bei dem an der einen Elektrode Ionen Elektronen aufnehmen und zur anderen transportieren. Dabei bereitet ihm das Diaphragma Probleme (s. Kap. 5.4.2.1). Diese Probleme würden bei einer der üblicheren Elektrolysezellen ohne Diaphragma nicht auftreten.

⁹⁶ Wenn man von einem unterbrochenen äußeren Stromkreis ausgeht sind die Vorgaben tatsächlich widersprüchlich.

6 Zusammenfassung der Diskussionen

In diesem Kapitel werden die Schlußfolgerungen, die sich aus der Diskussion der Ergebnisse⁹⁷ ergeben zusammengefaßt. Die Kernaussagen befinden sich am Ende jedes Absatzes und sind durch einen Balken an der linken Seite markiert. Sie stellen Argumente dar, die bei der Entscheidungsfindung für den Chemieunterricht berücksichtigt werden können und basieren auf der Struktur der Elektrochemie. In der Praxis spielen noch weitere Faktoren, wie die im Unterricht zur Verfügung stehende Zeit, eine Rolle, über die hier keine Aussagen getroffen werden.

Wenn man über Elektrochemie nachdenkt, hat man es mit elektrischen Stromkreisen zu tun. Daher treten Probleme auf, die aus den Schülervorstellungen zur Elektrizitätslehre resultieren. Das Schüler den Strombegriff aufgrund seiner größeren Anschaulichkeit dem Feldbegriff vorziehen, geht mit einer *lokalen Argumentation* einher. Dabei wird der globale Charakter des Systems übersehen. Statt dessen wird bei der Argumentation dem Weg der Elektronen gefolgt. Es werden *zeitliche Abfolgen* beschrieben, bei denen der eine Vorgang im Stromkreis den nächsten auslöst. Eine Ursache für eine solche Beschreibung könnte sein, daß die Schüler einen Startvorgang und keinen stationären Zustand beschreiben. Der Startvorgang findet direkt nach dem Schließen des Stromkreises statt. Er entspricht dem kurzen Zeitintervall, bei dem sich die Ladungsverteilung im Stromkreis einstellt. Nach dem Startvorgang befindet sich das System im stationären Zustand. Hier sind bei Gleichstromkreisen Stromstärke und Spannung zeitunabhängig. Eine Folge der Verwechslung von Startvorgang und stationärem Zustand ist die Attraktivität der Definition der Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol', ausgehend vom Strombegriff. Hierbei wird beispielsweise angenommen, daß der 'Minuspol' dadurch negativ werde, daß er Elektronen aufnehme. Diese Annahme ist logisch, wenn sie sich auf einen Startvorgang bezieht. Zur Beschreibung eines stationären Zustandes ist diese

⁹⁷ Siehe Kapitel 5.1.4, 5.2.4, 5.3.3, 5.4.4, 5.5.4, 5.6.4 und 5.7.3.

Art der Argumentation jedoch nicht sinnvoll, da in einem solchen Zustand keine Veränderung der Ladungsverteilung mehr stattfindet. An diesem Beispiel wird deutlich, daß auch 'falsche' Aussagen der Schüler oft aus logischem Denken resultieren.

In der Physik können die Pole über die elektrischen Feldlinien oder über die Ladungsverteilung im System definiert werden. In der Elektrochemie bezieht sich der Begriffsname 'Pol' auf eine Elektrode als Ganzes. Dabei versteht man unter der 'Elektrode' den Elektronenleiter, der in den Elektrolyten eintaucht. Für die Elektrochemie sind die Pole daher über die Ladungsverteilung definiert. Der 'Minuspole' ist dabei die Elektrode, an der ein Elektronenmangel herrscht. Die Begriffe 'Minuspole' und 'Pluspole' enthalten keine Information über die Richtung des Stromflusses. Die 'falsche' Schülerdefinition dieser Begriffe über den Strombegriff enthält jedoch eine solche Information. Wird beispielsweise, wie es in einigen Schulbüchern der Fall ist, der Begriff 'Minuspole' immer mit 'Elektronenabgabe' in Beziehung gesetzt, so unterstützt das eine falsche Vorstellung über die Bedeutung des Begriffes 'Minuspole'. Außerdem legt dieses Vorgehen die Vermutung nahe, daß an einem Minuspole immer eine Reduktion stattfindet. Diese Aussage ist aber nur für Elektrolysezellen richtig. In einer galvanischen Zelle findet am Minuspole eine Oxidation statt. Diese Tatsache stellt eine erhebliche Lernschwierigkeit dar. Man kann sie dadurch verstehen, daß man sich vor Augen hält, daß bei der galvanischen Zelle die chemischen Reaktionen die Ladungen der Elektroden aufrechterhalten. Bei der Elektrolysezelle werden die Ladungen der Elektroden hingegen von außen vorgegeben und stellen die Ursache der chemischen Reaktionen dar.

Die *lokale Argumentation* der Schüler kann auch zu einer falschen Beschriftung der Spannungsquelle einer Elektrolysezelle führen. Einige Schüler nehmen an, daß der Minuspole der Spannungsquelle mit der positiven Elektrode verbunden sei. Sie folgen dem Weg der Elektronen im Stromkreis und gehen beispielsweise davon aus, daß Elektronen immer von einem negativen zu einem positiven Punkt des Stromkreises fließen. Ihre Beschriftung enthält also die für einen realen, stromdurchflossenen Aufbau korrekte Aussage, daß der Minuspole der Quelle negativer ist als die mit ihr verbundene Elektrode. Auch hier zeigt sich, wie logisch die Schüler denken. Betrachtet man die daraus re-

sultierende Beschriftung für den gesamten Stromkreis, wird sie jedoch aus naturwissenschaftlicher Sicht falsch. Die Elektrode, die mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbunden ist, kann nicht positiver sein als die Elektrode, die mit dem Pluspol der Quelle verbunden ist.

Einige Physikdidaktiker schlagen vor, in der Schule den Feldbegriff zur Beschreibung von elektrischen Stromkreisen zu verwenden. Das hat den Vorteil, daß eine solche Beschreibung dem globalen Charakter der Systeme gerecht wird. Dem steht entgegen, daß sich Mechanismen, nach denen Prozesse ablaufen, mit dem Strombegriff, nicht aber mit dem Spannungsbegriff erklären lassen. Dafür sind die chemischen Reaktionen an den Elektroden ein Beispiel. Außerdem muß man davon ausgehen, daß die meisten Schüler den Feldbegriff nicht verstehen. Daher erscheint es als sinnvoll, elektrochemische Zellen im Chemieunterricht der Schule mit dem Strombegriff zu beschreiben. Ein Problem dabei ist, daß bei einem solchen Vorgehen auch die Beschreibungen des Lehrers lokaler Natur sind. Eine lokale Beschreibung ist aber unvermeidbar, wenn man beispielsweise die chemischen Reaktionen an einer Elektrode beschreiben möchte. Ein Schüler zeigt im Interview einen Weg aus diesem Dilemma. Auch er nutzt die *lokale Argumentation* und beschreibt somit *zeitliche Abfolgen*. Ihm ist jedoch bewußt, daß seine Beschreibung insofern falsch ist, als daß die Vorgänge eigentlich gleichzeitig stattfinden. Er wechselt im Gespräch von selbst auf eine Metaebene und bezeichnet sein Vorgehen als "Deswegen-Prinzip". Es scheint also möglich zu sein, zumindest in der Oberstufe die Grenzen der in der Schule verwendeten Beschreibungen auf einer Metaebene mit den Schülern zu diskutieren. Dabei wird automatisch über die Bedeutung wissenschaftlicher Modellvorstellungen diskutiert. Letzteres stellt ein wichtiges Lernziel des naturwissenschaftlichen Unterrichtes dar. Die globale Natur der Stromkreise kann auch mit Analogien wie dem Fahrradkettenmodell verdeutlicht werden.

Die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' werden von vielen Schülern als Synonyme der Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' verstanden. Zur Lösung dieses Problems kann es hilfreich sein, auf den entscheidenden Unterschied zwischen den Begriffspaaren hinzuweisen: Im Gegensatz zu den Begriffen 'Pluspol' und 'Minuspol' beinhalten die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' eine Information über die

Richtung des elektrischen Stromflusses. Aus diesem Grund können die beiden Begriffspaare nicht direkt miteinander verknüpft sein. Die bloße Feststellung, daß die Verknüpfung der Begriffspaare in Elektrolysezellen eine andere ist als in galvanischen Zellen reicht nicht aus. Dabei wird nur eine Gleichsetzung der Begriffspaare durch eine andere ersetzt. So kann nicht verstanden werden, warum es beide Begriffspaare gibt, und die auswendig gelernten Zuordnungen werden schnell wieder vergessen. Viele Schulbücher enthalten aber nicht einmal einen Hinweis auf die unterschiedlichen Verknüpfungen der Begriffspaare. Manche verwenden die Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' für alle Zellen, die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' hingegen nur für Elektrolysezellen. Das hat zur Folge, daß beispielsweise der Begriff 'Kathode' immer im Zusammenhang mit dem Begriff 'Minuspol' verwendet wird. Ein solches Vorgehen impliziert die Aussage, daß eine 'Kathode' immer der 'Minuspol' sei. Wenn man sich folglich dafür entscheidet, im Unterricht die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' zu verwenden, sollte dies sowohl für galvanische Zellen als auch für Elektrolysezellen geschehen.

Es gibt einen Grund dafür, die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' für die galvanischen Zellen nicht zu verwenden. Die Begriffe 'Anion' und 'Kation' wurden ursprünglich darüber definiert, daß sich die Ionen auf die entsprechende Elektrode zu bewegen. So bewegen sich beispielsweise 'Anionen' auf die 'Anode' zu. Das ist auch aus heutiger Sicht für alle stromdurchflossenen, elektrochemischen Zellen zutreffend. Aber im Gegensatz zur ursprünglichen Bedeutung der Begriffe steht beispielsweise der Begriff 'Anion' heute als Synonym für 'negativ geladenes Ion'. In einer galvanischen Zelle ist die Anode der Minuspol. Hier bewegen sich folglich negative 'Anionen' auf den Minuspol zu. Das ist korrekt, für die Schüler aber aufgrund der abstoßenden Wechselwirkung zweier gleichnamiger Ladungen verwirrend. Es wird erst einsehbar, wenn man genauer über die Vorgänge an den Elektroden informiert ist. Einige Schüler schließen fälschlicherweise aus der Aussage, daß sich 'Anionen' immer auf die 'Anode' zu bewegen, darauf, daß die 'Anode' immer positiv geladen sei. Auch dieser 'Fehler' resultiert aus guten, logischen Überlegungen. Durch die Vermeidung der Begriffe 'Anode' und 'Kathode' für galvanische Zellen wird

das Auftreten dieses Problems im Unterricht vermieden, es wird aber nicht gelöst.

Eine oft diskutierte Möglichkeit ist die vollständige Auslassung eines der beiden Begriffspaare im Unterricht. Das Problem dabei ist, daß beide Begriffspaare in der Alltagssprache verwendet werden. Die Auslassung der Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' erscheint nicht sinnvoll zu sein, da dann die Elektroden einer Zelle, in der kein Strom fließt, nicht bezeichnet werden können. In diesem Fall machen die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' keinen Sinn. Außerdem läßt sich experimentell leicht bestimmen, welche Elektrode welchem Pol entspricht. Auch im Alltag, beim Umgang mit Batterien, sind die Schüler an der Polung der Batterie interessiert. Dort ist es normalerweise nicht interessant, welche Elektrode die Kathode ist. Gegen die Auslassung der Begriffe 'Anode' und 'Kathode' im Chemieunterricht spricht, daß sie aus chemischer Sicht am interessantesten sind. Schließlich geben sie Aufschluß darüber, welche Reaktionen stattfinden. Wird nur über 'Pluspol' und 'Minuspol' argumentiert, kann leicht der Eindruck entstehen, in einer elektrochemischen Zelle sei, ähnlich eines Kondensators, elektrostatische Energie gespeichert. Die Tatsache, daß hier chemische Energie in elektrische Energie und elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt wird, ist jedoch das, was die Elektrochemie ausmacht.

Ein gewinnbringender Unterrichtsgegenstand könnte daher ein ausführlicher Vergleich zwischen einer galvanischen Zelle und einer Elektrolysezelle sein. Dabei kann über die jeweiligen Bedeutungen der Begriffspaare diskutiert werden. Das kann gut am Beispiel eines Akkumulators geschehen. Dieser entspricht beim Aufladen einer Elektrolysezelle und beim Entladen einer galvanischen Zelle.

Eine für den Schulunterricht praktikable und ausreichend korrekte Definition der Begriffe 'Anode' und 'Kathode' kann über eine Verknüpfung mit den Begriffen 'Oxidation' und 'Reduktion' erfolgen. Die hier vorgeschlagene Definition bedeutet, daß man beispielsweise feststellt, daß an einer Anode immer eine Oxidation und somit eine Elektronenabgabe erfolgt. Diese Definition ist nur dann eindeutig, wenn klar gestellt wird, daß die Teilchen, die oxidiert werden, Elektronen an die Elektrode abgeben. Einige Schüler deuten die Aussage

sonst mit einiger Berechtigung so, als würde die Elektrode als ganzes Elektronen abgeben.

Gehen die Schüler fälschlicher Weise davon aus, daß die Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' eine Information über die Stromrichtung enthalten, so ist in ihren Augen beispielsweise der 'Minuspol' der Pol, der Elektronen abgibt und damit ein Synonym für den Begriff 'Anode' bzw. 'Kathode'. Welche Begriffe in diesem Fall als gleichbedeutend angesehen werden, hängt von der Deutung der Begriffe 'Aufnahme' und 'Abgabe' durch den Schüler ab. Aus diesem Beispiel wird deutlich, daß die Beschreibung von Strömen prinzipiell aus unterschiedlichen Perspektiven erfolgen kann. Ein anders Beispiel dafür ist, daß die Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' in der falschen Schülerdefinition über den Strombegriff ihre Eindeutigkeit verlieren. So kann man davon ausgehen, daß der Minuspol negativ sei, weil er Elektronen aufgenommen habe. Es ist aber genauso logisch zu behaupten, daß der Minuspol Elektronen abgibt, weil er negativ sei. Dieser Freiheitsgrad existiert nur bei der Beschreibung eines Startvorganges. In einem stationären Zustand muß jeder Punkt des Stromkreises in jedem Zeitintervall genau so viele Elektronen abgeben wie er aufnimmt. Die Interviews zeigen, daß die Schüler wissen, welche Perspektive sie jeweils benutzen, ihnen aber nicht immer bewußt ist, daß es unterschiedliche Perspektiven gibt. Die Möglichkeit, einen Sachverhalt aus unterschiedlichen Perspektiven zu beschreiben, stellt ein Kommunikationsproblem dar, weil der Empfänger einer Botschaft nicht immer weiß, welche Perspektive der Sender verwendet. Bei einigen Beschreibungen ist es notwendig, innerhalb des Argumentationsstranges die Perspektive zu wechseln. Es können Probleme auftreten, weil die Schüler Perspektivenwechsel, die innerhalb ihrer Beschreibungen notwendig sind, nicht vollziehen.

Der Lehrer muß sich entscheiden, ob er im Unterricht nur die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol', die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' oder beide Begriffspaare verwenden möchte. Die Auslassung eines Begriffspaars kann eine Vereinfachung darstellen. Beide Begriffspaare sind jedoch wichtig. Die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' sind bei der Durchführung von Experimenten von großer Bedeutung, mit den Begriffen 'Anode' und 'Kathode' können die chemischen Prozesse in den Zellen hervorgehoben werden.

Wird entschieden, im Unterricht beide Begriffspaare zu verwenden ('Anode', 'Kathode' und 'Pluspol', 'Minuspol'), so sollte das sowohl für galvanische Zellen als auch für

Elektrolysezellen geschehen, da sonst eine falsche Begriffsbildung gefördert wird.

Die Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' können im Unterricht über 'Elektronenmangel' und 'Elektronenüberschuß', die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' über 'Oxidation' und 'Reduktion' definiert werden. Es kann hilfreich sein, zu verdeutlichen, daß die Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' keine Information über die Richtung des elektrischen Stroms enthalten. Die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' sagen hingegen etwas über die Richtung des Stromflusses aus, nicht aber über die Ladungsverteilung im System. Eine Vergleich zwischen galvanischen Zellen und Elektrolysezellen am Beispiel eines Akkumulators kann dies verdeutlichen.

Die Verwendung des Feldbegriffes im Chemieunterricht scheint nicht sinnvoll zu sein. Der Strombegriff könnte für die Beschreibung der Elektrochemie in der Schule besser geeignet sein. Das Problem, daß der Strombegriff den globalen Charakter des Systems nicht ausreichend beschreibt, kann durch eine Diskussion auf der Metaebene angegangen werden. Die Tatsache, daß die Beschreibung von Strömen aus unterschiedlichen Perspektiven erfolgen kann, führt zu Kommunikationsproblemen. Manchmal ist es aber notwendig, innerhalb eines Argumentationsstranges Perspektivenwechsel zu vollziehen. Die dadurch auftretenden Probleme können möglicherweise durch eine Bewußtmachung der unterschiedlichen Perspektiven gelöst werden.

Ein weiteres Problem beim Erlernen der Elektrochemie resultiert aus der Tatsache, daß in den im Physikunterricht der Mittelstufe diskutierten Stromkreisen nur metallische Leiter verwendet werden. Daraus schließen viele Schüler, daß nur der Fluß von Elektronen einen elektrischen Strom darstelle. Außerdem lernen die Schüler, daß ein Stromkreis geschlossen sein muß. Viele Schüler schließen daraus, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis einer elektrochemischen Zelle von der einen Elektrode zur anderen gelangen müßten, um den Stromkreis zu schließen. Andere Schüler gehen wiederum davon aus, daß der Elektronenaustausch zwischen der Oxidations- und der Reduktionsreaktion durch den inneren Stromkreis stattfände. Ein Grund für diese Annahme kann sein, daß die Schüler zwischen Physik und Chemie trennen. Demnach wäre ein Elektronenfluß in der Physik etwas anderes als ein Elektronenfluß in der Chemie. Geht ein Schüler davon aus, daß Strom verbraucht werde, kann er annehmen, daß die Quelle ihre Wirkung auf den Verbraucher durch den elektrischen Strom vermittele. Demnach stehe in dem äußeren Stromkreis und damit in der Physik ein Elektronenfluß stellvertretend für die Vermittlung einer

Wechselwirkung. In der Chemie könne der Austausch von Elektronen zwischen Atomen oder Molekülen bei einer Redoxreaktion einen Elektronenfluß darstellen. Folglich bedeute ein Elektronenfluß in der Chemie etwas anders als ein Elektronenfluß in der Physik. Der Elektronentransfer der Redoxreaktion müßte dann durch den inneren Stromkreis stattfinden.

Die Annahme, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis von einer Elektrode zur anderen gelangten, hat die von den Schülern beschriebenen falschen Leitungsmechanismen in Elektrolyten zur Folge. Einige Schüler bemerken von sich aus, daß durch den inneren Stromkreis keine Elektronen gelangen können. Sie begründen es damit, daß die Elektronen, die von einer Elektrode in einen Elektrolyten gelangen, dort durch eine Reduktionsreaktion gebunden werden.

Manche Schüler gehen davon aus, daß in den Lösungen zunächst keine Ionen existierten. Sie entstünden erst durch die Wirkung des elektrischen Stroms. Diese Vorstellung hat eine Entsprechung in der Wissenschaftsgeschichte. Daran läßt sich erkennen, wie gut die Schüler im naturwissenschaftlichen Denken sind. Einige Vorstellungen, die denen der Schüler ähneln, waren früher einmal wissenschaftlich anerkannt. Die Annahme, daß die Lösungen Ionen enthalten, ist Voraussetzung für die wissenschaftlich korrekte Beschreibung des Leitungsmechanismus in Elektrolyten.

Aus den Interviews wird deutlich, welche Voraussetzungen notwendig sind, um zu verstehen, daß durch den inneren Stromkreis einer elektrochemischen Zelle keine Elektronen fließen:

1. Der Elektronentransfer zwischen der Oxidations- und der Reduktionsreaktion findet durch den äußeren Stromkreis statt.
2. Nicht nur der Fluß von Elektronen, sondern jede bewegte Ladung stellt einen elektrischen Strom dar. Folglich genügt der Fluß von Ionen durch die Lösungen, um den Stromkreis zu schließen.
3. Freie Elektronen sind in den Lösungen nicht beständig. Sie bewirken beim Austritt aus einer Elektrode eine Reduktionsreaktion.
4. Der Stromfluß im inneren Stromkreis ist notwendig, um der Ladungstrennung durch die räumlich geordnete Elektronenübertragung über den äußeren Stromkreis entgegenzuwirken.

Die in dieser Arbeit beschriebenen falschen Leitungsmechanismen in Elektrolyten folgen alle aus der Annahme, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis gelangen

müßten. Diese Vorstellung behindert die Bildung einer aus wissenschaftlicher Sicht korrekten Beschreibung. Des weiteren ist es für das Verständnis des Leitungsmechanismus wichtig, zu wissen, daß die Lösungen Ionen enthalten. Die Wissenschaftsgeschichte zeigt, daß dies nicht leicht einzusehen ist.

Die Vorgänge in einem Diaphragma sind einfacher zu beschreiben als die in einer Salzbrücke. Dennoch bereitet das Diaphragma den Schülern in den Interviews Probleme. Einige folgern aus der Aussage, die Funktion des Diaphragmas sei es, ein Vermischen der Lösungen zu verhindern, daß es für Ionen undurchlässig sein müsse. Diese Folgerung ist logisch und stellt eine große Leistung der Schüler dar. Ein Diaphragma, das verhindert, daß sich die Lösungen vermischen, muß zumindest für bestimmte Ionensorten undurchlässig sein. In einer vereinfachten Darstellung ist das Diaphragma für alle Ionensorten durchlässig. Ein derartiges Diaphragma verhindert nur für die Dauer des Versuches eine merkliche Mischung der Lösungen. Das wird verständlich, wenn man die Zeiträume vergleicht, in denen sich Lösungen durch Diffusion und durch makroskopische Strömungen mischen. Das Diaphragma verhindert makroskopische Strömungen, nicht aber die Diffusion der Ionen zwischen den Lösungen.

Die Aussage, daß das Diaphragma zum Schließen des Stromkreises notwendig ist, liefert den Schülern keine ausreichende Erklärung.

Die Aussagen, daß das Diaphragma ein Vermischen der Lösungen verhindert und daß es alle Ionen durchläßt, sind widersprüchlich. Korrekter müßte es heißen, daß ein derartiges Diaphragma für die Dauer des Versuches ein merkliches Vermischen der Lösungen verhindert.

Ist beim Experimentieren die Verwendung eines Diaphragmas möglich, sollte es einer Salzbrücke vorgezogen werden. Die Vorgänge in einem Diaphragma sind nicht so komplex wie die in einer Salzbrücke.

Für eine genaue Beschreibung der Vorgänge an den Elektroden ist die Vorstellung von Hin- und Rückreaktionen notwendig. Im stromlosen Fall herrscht an den Elektroden ein dynamisches Gleichgewicht. Dies macht die Beschreibung jedoch unübersichtlicher. In einem Interview hat das dazu geführt,

daß die Notwendigkeit eines Elektronenaustauschs zwischen den Elektroden bei einer stromdurchflossenen Zelle von einem Schüler übersehen wurde.

Aufgrund der hohen Komplexität des Themas Elektrochemie ist es fraglich, ob eine Beschreibung der Elektrodenreaktionen über Hin- und Rückreaktionen in der Schule sinnvoll ist.

In den Interviews hat sich gezeigt, daß die Schüler aus den Beispielen, die im Unterricht thematisiert wurden, *kritische Attribute* für den Begriff 'Elektrolyse' ableiten. Dabei werden von den Schülern auch *Attribute* angegeben, die in Lehrbüchern nicht explizit genannt werden. Das steht im Einklang mit lerntheoretischen Beschreibungen der *Begriffsbildung*.

Der entscheidende Unterschied zwischen einer Elektrolysezelle und einer galvanischen Zelle ist der, daß bei der Elektrolyse die chemischen Reaktionen von außen erzwungen werden, während sie bei einer galvanischen Zelle freiwillig ablaufen. Andere, mögliche Unterschiede – wie die Existenz eines Diaphragmas – sind keine Unterscheidungsmerkmale.

7 Bewertung der Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit wurden Schülervorstellungen zur Elektrochemie untersucht. Dabei gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten. Zum einen können die Vorstellungen weniger Schüler sehr genau betrachtet und somit viele Informationen über einzelne Personen gesammelt werden. Zum anderen ist es möglich, die Vorstellungen vieler Schüler zu untersuchen. Dabei werden jedoch nur wenige Informationen über den einzelnen Schüler gesammelt. Ein klares Bild des untersuchten Gegenstandes kann durch die Kombination beider Ansätze erzielt werden. Daher besteht die an der Universität Dortmund durchgeführte Untersuchung von Schülervorstellungen zur Elektrochemie bisher aus zwei Studien. An der ersten Studie (MAROHN, 1999) nahmen mehrere tausend Schüler teil. Dadurch konnten nicht nur mögliche Probleme beim Erlernen von Elektrochemie erkannt, sondern auch Hinweise auf deren Häufigkeit gesammelt werden. Eine genaue Beschreibung der Vorstellungen einzelner Schüler war ausgehend von den Daten dieser Untersuchung jedoch nicht möglich. Bei der verwendeten Methode konnten jedem Schüler nur ein bis zwei im vorhinein festgelegte Fragen zur Elektrochemie gestellt werden. Daher ließen die Daten keine Aussagen über die Verknüpfung der einzelnen Vorstellungen untereinander zu, sie konnten nur isoliert voneinander untersucht werden. Die Untersuchung der Verknüpfung macht eine intensive Auseinandersetzung mit den Vorstellungen einzelner Schüler notwendig. Daher wurde die hier vorliegende, zweite Studie mit wenigen Schülern durchgeführt. Aus ihr ergab sich ein klares Bild der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Vorstellungen der Interviewpartner, wodurch eine qualitative Bewertung der Beschreibungen der Schüler möglich wurde. Insbesondere zeigte sich, von welchen Annahmen die Schüler ausgingen und wodurch Probleme entstanden. Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus der Untersuchung mit der größeren Schülergruppe (MAROHN) konnte zeigen, ob die bei der Interviewstudie beobachteten Lernschwierigkeiten Einzelfälle darstellen, oder ob sie verbreitet sind.

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Schwierigkeiten der Schüler mit der Elektrochemie ergeben sich aus der Struktur des Themas, durch die bestimmte Probleme und 'Fehler' besonders naheliegend sind. Es ist daher zu erwarten, daß solche Probleme keine Einzelfälle darstellen. Aus diesem Grund

sind die Ergebnisse der Interviewstudie verallgemeinerbar. Ausgehend von den Beschreibungen der Schüler fand eine Reflexion der naturwissenschaftlich anerkannten Vorstellungen statt. Daraus ergaben sich konkrete, auf den Chemieunterricht bezogene Aussagen. So konnte beispielsweise festgestellt werden, welche Voraussetzungen erfüllt sein mußten, damit ein bestimmter Sachverhalt verstanden werden konnte und welche Formulierungen in Schulbüchern oder im Unterricht von den Schülern mißverstanden wurden und somit zur Entwicklung 'falscher' Vorstellungen beitrugen.

Die Tatsache, daß ein Schüler im Interview eine bestimmte Aussage machte, ist kein Beleg dafür, daß die entsprechende Vorstellung auch bei anderen Schülern auftreten muß. Aus der Logik, die in den Aussagen gesehen werden kann, zeigt sich jedoch, welche Vorstellungen aufgrund der Struktur des Themas naheliegend sind. Für solche Vorstellungen ist die Wahrscheinlichkeit groß, sie auch bei anderen Schülern zu finden. Die in der vorliegenden Arbeit abgedruckten Schülerzitate dienen daher nicht dem Beweis, sondern der Illustration der beschriebenen Vorstellungen. Der Anspruch auf Verallgemeinerbarkeit ergibt sich aus der Diskussion der Schüleraussagen, bei der die Ursachen der Vorstellungen herausgearbeitet werden.

Die Aussagekraft der Ergebnisse wurde dadurch erhöht, daß die Resultate mehrerer Analyseansätze, bei denen unterschiedliche Methoden zur Anwendung kamen, miteinander verglichen wurden. Dieses Vorgehen wird als *Triangulation* bezeichnet. Die Ergebnisse von MAROHN (1999) wurden bei der Diskussion der Ergebnisse der vorliegenden Interviewstudie berücksichtigt. Dabei bestätigte sich die Annahme, daß Probleme, die sich aus der Struktur des zu lernenden Inhaltes ergeben, bei vielen Schülern auftreten.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie und deren Interpretation sind in Form von acht 'Geschichten' dargestellt. Um Ergebnisse und Interpretationen möglichst getrennt voneinander darzustellen, gliedern sich die 'Geschichten' in zwei Teile. Der erste Teil soll dem Leser einen Eindruck von den Interviews vermitteln. Hier sind die für die jeweilige 'Geschichte' relevanten Aussagen der Schüler zusammengefaßt. Dieser Teil entspricht der Darstellung der Ergeb-

nisse⁹⁸. Im zweiten Teil der 'Geschichten' werden die Ergebnisse interpretiert. Dabei werden Informationsquellen hinzugezogen und Vergleiche mit den Ergebnissen anderer Forscher angestellt. Die Interpretationen werden im Text aus dem Datenmaterial abgeleitet. Die Darstellung ist so detailliert, daß es dem Leser möglich ist, die Interpretationen zu bewerten.

Die Interpretation der Ergebnisse der Interviewstudie führte zu Argumenten, die bei der Planung von Unterricht zum Thema Elektrochemie berücksichtigt werden können. Es ist dem Leser überlassen, inwieweit er sich diesen Argumenten anschließen mag. Als Beispiel möge an dieser Stelle die Stellungnahme 24 (Seite 182) dienen. Dort wird auf Argumente dafür verwiesen, in der Schule die Begriffe 'Anode', 'Kathode' und 'Minuspol', 'Pluspol' für alle elektrochemischen Zellen zu verwenden. Nach der vom Autor vertretenen Auffassung, kann der Lehrer am besten entscheiden, ob es für seinem Chemiekurs sinnvoll ist, beide Begriffspaare zu verwenden oder ob er beispielsweise auf die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' verzichten will. Er kennt seine Schüler, deren Interessen und die Rahmenbedingungen seines Unterrichts. Die in dieser Arbeit angeführten Argumente können ihm bei der Entscheidungsfindung helfen. Sie orientieren sich an der Struktur der Elektrochemie und sind daher auf jeden Kurs, in dem dieses Thema unterrichtet werden soll, übertragbar. Für Entscheidungen im konkreten Einzelfall sind jedoch auch andere Argumente zu berücksichtigen, die sich beispielsweise aus den Rahmenbedingungen ergeben. Diese Entscheidungen können dem Lehrer daher nicht abgenommen – sie können nicht im Sinne wissenschaftlich belegbarer Ergebnisse gefunden werden.

Die geführten Interviews zeichneten sich durch ihre zeitliche Länge und durch ihre Offenheit aus. In die Ergebnisse dieser Arbeit flossen nur solche Aussagen der Schüler ein, die Teil einer Argumentationskette waren, die der Forscher

⁹⁸ Die Tatsache, daß die Auswahl und die Zusammenstellung der dargestellten Ergebnisse bereits eine Interpretation der Daten beinhaltet, ist unausweichlich. Das gilt für jeden (Fortsetzung auf der nächsten Seite)

nachvollziehen konnte. Durch das zyklische Vorgehen in den Interviews haben die Schüler ihre Aussagen mehrmals aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet. Dadurch wurde sichergestellt, daß es sich bei den Ergebnissen der vorliegenden Studie nicht um unüberlegte Aussagen der Schüler handelt. Die Validität dieser Ergebnisse ist unter diesem Gesichtspunkt höher als die eines strukturierten Interviews, bei dem den Schülern vorformulierte Fragen gestellt werden, über die sie nur wenige Minuten nachdenken können, bevor eine neue Frage zum nächsten Thema gestellt wird. Das gilt auch im Vergleich zu einem schriftlichen Verfahren der Datenerhebung, bei dem die Schüler auf eine bestimmte Anzahl von Fragen eines Fragebogens zu unterschiedlichen Themen antworten.

8 Ausblick

Die Stellungnahmen in Kapitel 5 und die Zusammenfassung der Diskussionen (Kap. 6) beziehen sich bereits direkt auf den Chemieunterricht. Es wird hier die Meinung vertreten, daß den Grundlagen der Elektrochemie große Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte. Dazu kann es notwendig sein, andere Inhalte auszulassen. Es erscheint wenig sinnvoll, weiterführende Themen anzugehen, bevor die Grundlagen wirklich verstanden worden sind. Positiver formuliert kann man davon ausgehen, daß es jemandem, der auf einem guten Fundament baut, leichter fallen dürfte, die weiterführenden Konzepte zu verstehen, als jemandem, der mit den Grundlagen Probleme hat.

Über die Umsetzung im Unterricht wird in der vorliegenden Arbeit keine Aussage gemacht. Der Lehrer kann am besten entscheiden, was für seine Schüler angemessen ist. Die vorliegende Arbeit kann dem Lehrer einige Informationen und Anregungen geben. Es ist auch denkbar, daß Chemiedidaktiker, die Unterrichtskonzeptionen entwickeln, die hier vorliegenden Ergebnisse aufgreifen.

Die Untersuchung von Schülervorstellungen zur Elektrochemie begann in Dortmund mit einer umfangreichen schriftlichen Untersuchung (MAROHN, 1999) und wurde durch die vorliegende Arbeit mit Einzelinterviews weitergeführt. Dies bedeutet eine stärkere Annäherung an den Forschungsgegenstand. Darüber hinaus wurden Gruppendiskussionen zum Thema Elektrochemie geführt. Da es sich bei den Teilnehmern um Lerngruppen handelt, die in der gleichen Zusammensetzung in der Schule Chemie lernen, stellt dies eine weitere Annäherung an den Forschungsgegenstand dar. Die Auswertung der vorliegenden Gruppendiskussionen steht noch aus, die Methode wird von EYBE & SCHMIDT (im Druck b) beschrieben. Um sich dem Schulalltag noch weiter anzunähern, sind Unterrichtsbeobachtungen denkbar. Auch eine teilnehmende Beobachtung, bei der der Forscher eng mit den Lehrern und Schülern zusammenarbeitet, kann vielversprechend sein. Hier kann ein fließender Übergang von der empirischen Forschung zur Entwicklung neuer Unterrichtskonzeptionen stattfinden.

9 Kurzfassung

Lernen ist ein aktiver Prozeß, bei dem der Lernende sein Wissen erweitert und neu organisiert. Daher ist das Vorwissen der Schüler für den Unterricht von entscheidender Bedeutung. In der vorliegenden Studie wurden Schülervorstellungen zur Elektrochemie untersucht. Besonderes Interesse galt dabei der Frage, wie die einzelnen Vorstellungen miteinander verknüpft sind. Es sollte beispielsweise festgestellt werden, ob Schüler bestimmte Vorstellungen aus anderen ableiten. Eine solche Information ist für den Chemieunterricht von großem Interesse, weil daraus ersichtlich wird, welche Voraussetzungen für das Verstehen bestimmter Sachverhalte gegeben sein müssen.

Zunächst wurden Methoden für die Untersuchung der Vernetzung der Schülervorstellungen zur Elektrochemie entwickelt und erprobt. Mit Hilfe dieser Methoden wurden zehn Interviews mit Schülern durchgeführt und analysiert. Die Schüler besuchten zum Zeitpunkt der Interviews die Klassen zwölf und dreizehn der gymnasialen Oberstufe. Alle hatten bereits das Thema Elektrochemie in der Oberstufe behandelt. Es wurden jeweils zwei Schüler eines Chemiekurses befragt.

Insgesamt dauerte ein Interview 90 Minuten. Die Gespräche wurden durch zwei Skizzen strukturiert. Die eine Skizzen stellte eine galvanischen Zelle, die andere eine Elektrolysezelle dar. Die Aufgaben, diese Skizzen zu beschreiben, zu beschriften und miteinander zu vergleichen, gewährleisteten, daß im Interview über alle grundlegenden Konzepte der Schulelektrochemie gesprochen wurde. Gleichzeitig waren die Interviews so offen, daß auf die Probleme der einzelnen Schüler mit dem Thema Elektrochemie eingegangen werden konnte.

Die Interviews wurden aufgezeichnet und transkribiert. Bei der Analyse wurden in mehreren Schritten die Argumentationsstränge aus den Gesprächen herausgearbeitet. So wurde eine überschaubare Darstellung der Interviews erreicht. Aus den Argumentationssträngen wurden die einzelnen Vorstellungen der Schüler über Elektrochemie, ihre Vernetzung und Entwicklung in den langen Gesprächen deutlich. Die so erhaltenen Ergebnisse wurden ausgehend von der naturwissenschaftlich anerkannten Beschreibung der Elektrochemie diskutiert und mit den Ergebnissen anderer Forscher verglichen. So konnten ei-

nige Probleme, die sich beim Lernen von Elektrochemie aus der Struktur des zu lernenden Inhaltes ergeben, identifiziert und beschrieben werden. Daraus ergaben sich Argumente, die bei der Planung des Chemieunterrichts berücksichtigt werden können. Sie basieren auf der Struktur der Elektrochemie. Über andere Faktoren, die dabei zu berücksichtigen sind, werden hier keine Aussagen getroffen.

Zwei in der Elektrochemie besonders wichtige Begriffspaare sind 'Minuspol', 'Pluspol' und 'Anode', 'Kathode'. Für den Unterricht muß die Entscheidung getroffen werden, ob beide Begriffspaare oder nur eines von beiden verwendet werden sollen. Die Auslassung eines Begriffspaares kann eine Vereinfachung darstellen, beide Begriffspaare sind jedoch wichtig. Die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' sind beispielsweise bei Experimenten besonders wichtig, da sich leicht bestimmen läßt, welche Elektrode welchem Pol entspricht. Die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' sind aus chemischer Sicht interessant, da sie mit den Elektrodenreaktionen verknüpft sind. Wird entschieden, beide Begriffspaare im Unterricht zu verwenden, so sollte das sowohl für galvanische Zellen als auch für Elektrolysezellen geschehen. Sonst entsteht bei den Schülern der falsche Eindruck, die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' seien Synonyme der Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol'.

Die Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' können im Unterricht über 'Elektronenmangel' und 'Elektronenüberschuß', die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' über 'Oxidation' und 'Reduktion' definiert werden. Letzteres bedeutet, daß an der Anode eine Elektronenabgabe stattfindet. Damit diese Aussage eindeutig wird, muß zusätzlich angegeben werden, daß das Teilchen, welches oxidiert wird, Elektronen an die Elektrode abgibt. Die Schüler können die Aussage ansonsten auch so deuten, daß die Elektrode Elektronen abgibt. Es kann hilfreich sein, zu verdeutlichen, daß die Begriffe 'Pluspol' und 'Minuspol' keine Information über die Richtung des elektrischen Stroms enthalten. Die Begriffe 'Anode' und 'Kathode' sagen hingegen etwas über die Richtung des Stromflusses aus, nicht aber über die Ladungsverteilung im System. Ein Vergleich zwischen galvanischen Zellen und Elektrolysezellen am Beispiel eines Akkumulators kann dies verdeutlichen.

Im vorangegangenen Absatz wurde bereits erwähnt, daß der Begriff 'Elektronenabgabe' aus unterschiedlichen Perspektiven gesehen werden kann. Das gilt ganz allgemein für die Beschreibung eines Stroms. So kann man beispielsweise davon ausgehen, daß der Minuspol Elektronen abgibt, weil er negativ geladen sei. Die Annahme, daß der Minuspol negativ sei, weil er Elektronen aufgenommen habe, ist jedoch genauso logisch. In dieser Beschreibung verlieren die Begriffe 'Minuspol' und 'Pluspol' ihre Eindeutigkeit. Aus diesem Beispiel wird deutlich, daß viele Schüler, wenn sie über elektrische Stromkreise nachdenken, keinen stationären Zustand, sondern einen Startvorgang vor Augen haben. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Sachverhalte aus unterschiedlichen Perspektiven zu beschreiben. Die Tatsache, daß die Schüler unterschiedliche Perspektiven verwenden, führt zu Kommunikationsproblemen. Einige Beschreibungen der Schüler können jedoch nur konsistent sein, wenn innerhalb der Argumentationskette ein Perspektivenwechsel vollzogen wird. Die dadurch auftretenden Probleme können möglicherweise durch eine Bewußtmachung der unterschiedlichen Perspektiven gelöst werden.

Die Verwendung des Feldbegriffes im Chemieunterricht scheint nicht sinnvoll zu sein. Der Strombegriff scheint für die Beschreibung der Elektrochemie in der Schule besser geeignet. Das Problem, daß der Strombegriff den globalen Charakter des Systems nicht ausreichend beschreibt, kann durch eine Diskussion auf der Metaebene angegangen werden.

Es sind folgende Voraussetzungen notwendig, um zu verstehen, daß durch den inneren Stromkreis einer elektrochemischen Zelle keine freien Elektronen fließen:

1. Der Elektronentransfer zwischen der Oxidations- und der Reduktionsreaktion findet durch den äußeren Stromkreis statt.
2. Nicht nur der Fluß von Elektronen, sondern jede bewegte Ladung stellt einen elektrischen Strom dar. Folglich genügt der Fluß von Ionen durch die Lösungen, um den Stromkreis zu schließen.
3. Freie Elektronen sind in den Lösungen nicht beständig. Sie bewirken beim Austritt aus einer Elektrode eine Reduktionsreaktion.

4. Der Stromfluß im inneren Stromkreis ist notwendig, um der Ladungstrennung durch die räumlich geordnete Elektronenübertragung über den äußeren Stromkreis entgegenzuwirken.

Aus der Annahme, daß Elektronen durch den inneren Stromkreis gelangen müßten, leiten die Schüler falsche Vorstellungen über den Leitungsmechanismus in Elektrolyten ab. Eine korrekte Beschreibung des Leitungsmechanismus setzt außerdem die Annahme voraus, daß sich in den Lösungen Ionen befinden. Die Wissenschaftsgeschichte zeigt, daß dies nicht leicht einzusehen ist.

Die Feststellung, daß das Diaphragma zum Schließen des Stromkreises notwendig ist, liefert den Schülern keine ausreichende Erklärung.

Die Aussagen, daß das Diaphragma ein Vermischen der Lösungen verhindert und daß es für alle Ionensorten durchlässig ist, sind widersprüchlich. Korrekter müßte es heißen, daß ein derartiges Diaphragma für die Dauer des Versuchs ein merkliches Vermischen der Lösungen verhindert.

Aufgrund der hohen Komplexität des Themas Elektrochemie ist es fraglich, ob eine Beschreibung der Elektrodenreaktionen über Hin- und Rückreaktionen in der Schule sinnvoll ist.

Die oben beschriebenen Probleme zeigen, wie logisch die Schüler denken. Viele ihrer 'Fehler' stellen eine große intellektuelle Leistung dar. Oft gehen die Schüler von einer falschen Annahme aus und leiten ihre weiteren Aussagen konsequent daraus ab. Viele dieser falschen Annahmen resultieren aus logischem Denken. Kennt der Lehrer die falschen Annahmen, kann er im Unterricht auf sie eingehen. So können die in der vorliegenden Studie gewonnenen Ergebnisse für den Chemieunterricht hilfreich sein.

10 Literaturverzeichnis

- ADEY, P. (Ed.). (1987). *Adolescent Development and School Science*. New York: The Falmer Press.
- ANDERSSON, B. (1984). "Wie Schüler einige Aspekte des Energietransfers im elektrischen Stromkreis verstehen." *Der Physikunterricht*, 18, 32-35.
- ATKINS, P. W. (1990). *Physikalische Chemie*. [*Physical Chemistry*, deutsch]. Übers. v. Höpfner, A. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH.
- BARRAL, F. L., FERNANDEZ, E. G.-R., OTERO, J. R. G. (1992). "Secondary Students' Interpretations of the Process Occurring in an Electrochemical Cell." *Journal of Chemical Education*, 69, 655-657.
- BERGMANN, L., SCHAEFER, C. (1971) siehe unter GOBRECHT, H.
- BODNER, G. M. (1986). "Constructivism: A Theory of Knowledge." *Journal of Chemical Education*, 63, 873-878.
- BORGES A. T., GILBERT, J. K. (1999). "Mental models of electricity." *International Journal of Science Education*, 21, 95-117.
- BOTSCH, W. (1993). "Geschichte der Elektrochemie". *Praxis der Naturwissenschaften Chemie*. 42. 15-21
- BRANDT, S., DAHMEN, H. D. (1986). *Physik – Eine Einführung in Experiment und Theorie – Band 2 Elektrodynamik*. Berlin: Springer-Verlag.
- BRICKHOUSE, N. W. (1992). "Ethics in Field-Based Research: Ethical Principles and Relational Considerations." *Science Education*, 76, 93-103.
- BROCKHAUS DER NATURWISSENSCHAFT UND TECHNIK (1971). Wiesbaden: Brockhaus.
- BUGGE G. (1965). *Das Buch der großen Chemiker, Teil II*. Weinheim: Verlag Chemie.

- BURGER, N. (1996). *Elektrochemie im Chemieunterricht der Sekundarstufe II – eine Vorstudie zur Untersuchung von Schülervorstellungen*. Unveröffentlichte Hausarbeit im Rahmen der Staatsprüfung für das Lehramt für die Sekundarstufe II
- BUTTS, B., SMITH, R. (1987a). "What do students perceive as difficult in HSC Chemistry?" *The Australian Science Teachers Journal*, 32, 45-51.
- BUTTS, B., SMITH, R. (1987b). "HSC Chemistry Students' understanding of the Structure and Properties of Molecular and Ionic Compounds". *Research in Science Education*, 17, 192-201.
- CLOSSET, J.-L. (1984). "Woher stammen bestimmte 'Fehler' von Schülern und Studenten aus dem Bereich der Elektrizitätslehre? Kann man sie beheben?" *Der Physikunterricht*, 18, 21-31.
- DE JONG, O., SCHMIDT, H.- J., BURGER, N., EYBE, H. (1998). *Empirical Research into Chemical Education – The motivation, research domains, methods and infrastructure of a maturing scientific discipline*. Position paper presented by The FECS Division of Chemical Education.
- DRIVER, R. (1989). "Students' conceptions and the learning of science." *International Journal of Science Education*, 11, 481-490.
- DUIT, R. (1986a). "Energievorstellungen." *Naturwissenschaft im Unterricht Physik/Chemie*, 34.
- DUIT, R. (1986b). *Der Energiebegriff im Physikunterricht*. Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel.
- DUIT, R. (1990). "Zur Parallelität von Vorstellungen heutiger Schüler und Vorstellungen in der Geschichte der Wissenschaften." In: GDCP (Hg.). *Zur Didaktik der Physik und Chemie: Probleme und Perspektiven; Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie*. Hannover: Leuchtturm-Verlag. Seite 239 ff.
- DUNSCH, L. (1985). *Geschichte der Elektrochemie – Ein Abriss*. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.

- EDELMANN, W. (1986). *Lernpsychologie – eine Einführung*. München: Psychologie-Verlags-Union.
- EYBE, H., SCHMIDT, H.-J. (im Druck a). "Quality Criteria and Exemplary Papers in Chemistry Education Research." *International Journal of Science Education*.
- EYBE, H., SCHMIDT, H.-J. (im Druck b). "Group Discussions as a Research Method in Chemistry Education." *International Journal of Science Education*.
- FALBE, J., REGITZ, M. (1997). *Chemie Lexikon / Römpf. Bd. 2*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- FARADAY, M. (1897). *Experimental – Untersuchungen über Elektrizität VII Reihe*. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann. [unveränderter Nachdruck: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften 87. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1985]
- FEYNMAN, R. P. (1991). *Vorlesungen über Physik*. Frankh'sche Verlags- handlung.
- FINLEY, F. N., STEWART, J., YARROCH, L. (1982). "Teachers' perceptions of important and difficult science content." *Science Education*, 66, 531-538
- GAGNÉ, R. M. (1969) *Die Bedingungen des menschlichen Lernens*. [*The Conditions of Learning*, deutsch]. Übers. v. Skowronek, H. Hannover: Schroedel Verlag.
- GARNETT, P. J., GARNETT, P. J., TREAGUST, D. F. (1990) "Implications of research on students' understanding of electrochemistry for improving science curricula and classroom practice." *International Journal of Science Education*, 12, 147-156.
- GARNETT, P. J., TREAGUST, D. F. (1992a). "Conceptual Difficulties Experienced by Senior High School Students of Electrochemistry: Electric Circuits and Oxidation-Reduction Equations." *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 121-142.

- GARNETT, P. J., TREAGUST, D. F. (1992b). "Conceptual Difficulties Experienced by Senior High School Students of Electrochemistry: Electrochemical (Galvanic) and Electrolytic Cells." *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 1079-1099.
- GERHARTL, F. J. (1998). "Kurzschluß im Chemie-Unterricht – Die Heilsamkeit von Voltammogrammen". *Praxis der Naturwissenschaften Chemie*, 47, 42-45.
- GILBERT, J. K., WATTS, D. M. (1983). "Concepts, Misconception and Alternative Conceptions: Changing Perspectives in Science Education." *Studies in Science Education*, 10, 61-98.
- GOBRECHT, H. (1971). *Bergmann-Schaeffer Lehrbuch der Experimentalphysik – Band II Elektrizität und Magnetismus*. Berlin: Walter de Gruyter & Co.
- GRIFFITHS, A. K. (1994). "A critical analysis and synthesis of research on students' chemistry misconceptions." In: SCHMIDT, H.-J. (Ed.). *Proceedings of the 1994 International Symposium: Problem Solving and Misconceptions in Chemistry and Physics*. Hong Kong: International Council of Associations for Science Education.
- GUTJAHR, G. (1985). *Psychologie des Interviews in Praxis und Theorie*. Heidelberg: I. H. Sauer-Verlag.
- HAMANN, C. H., VIELSTICH, W. (1998). *Elektrochemie*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft.
- HERMANN, A. (1986). *Ostwalds Klassiker der Exakten Wissenschaften – Die Begründung der Elektrochemie und Entdeckung der ultravioletten Strahlen von Johann Wilhelm Ritter – Eine Auswahl aus Schriften des romantischen Physikers*. Frankfurt: Akademische Verlagsgesellschaft.
- IUPAC (Hg.). (1974). "Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units – Appendix III: Electrochemical Nomenclature." *Pure Applied Chemistry*, 37, 499-516.

- JAKUBKE, H.-D., JESCHKEIT, H. (1987). *Fachlexikon ABC Chemie (A-K)*. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch.
- JANSEN, W. (1982). "Zur Geschichte der Elektrochemie" *Naturwissenschaft im Unterricht Physik/Chemie*. 30, 259-254.
- JOHNSON, P., GOTT, R. (1996). "Constructivism and Evidence from Children's Ideas." *Science Education*, 80, 561-577.
- KELLY, G. A. (1986). *Die Psychologie der persönlichen Konstrukte [The Psychology of Personal Constructs, deutsch]*. Übers. v. Danzinger-Tholen, E. Paderborn: Jungfermann-Verlag.
- KELLY, G. J. (1997). "Research Traditions in Comparative Context: A Philosophical Challenge to Radical Constructivism." *Science Education*, 81, 355-375.
- KITTEL, CH. (1993). *Einführung in die Festkörperphysik*. München: Oldenbourg Verlag.
- KLAASSEN, C. W. J. M., LIJNSEN, P. L. (1996). "Interpreting Students' and Teachers' Discourse in Science Classes: An Underestimated Problem?" *Journal of Research in Science Teaching*, 33, 115-143.
- KORTÜM, G. (1966). *Lehrbuch der Elektrochemie*. Weinheim: Verlag Chemie.
- KUCHLING, H. (1988). *Taschenbuch der Physik*. Frankfurt a. M.: Verlag Harri Deutsch.
- KUHN, T. S. (1967). *Die Struktur wissenschaftlicher Revolution [The Structure of Scientific Revolution, deutsch]*. Übers. v. Vetter, H. Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag.
- KUNSMÜLLER. (1970). *Meyers Lexikon der Technik und der exakten Naturwissenschaften*. Mannheim: Bibliographisches Institut.
- KVALE, S. (1996). *InterViews – An Introduction to Qualitative Research Interviewing*. London: SAGE Publications.

- LEE, K. W., FENSHAM, P. J. (1996). "A general strategy for solving high school electrochemistry problems." *International Journal of Science Education*, 18, 543-555.
- LEFRANCOIS, G. R. (1986). *Psychologie des Lernens*. [Psychological Theories and Human Learning: Kongors Report, deutsch]. Übers. v. Leppmann, K., Angermeier, W. F., Thiekötter, Th. Berlin: Springer Verlag.
- MAROHN, A. (1999). *Falschvorstellungen in der Elektrochemie – eine empirische Untersuchung*. Dissertation, Universität Dortmund
- MAYRING, P. (1996). *Einführung in die qualitative Sozialforschung*. München: Psychologie-Verlags-Union.
- MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (HG.). (19881). *Richtlinien für die gymnasiale Oberstufe in Nordrhein-Westfalen: Chemie*. Rechen: Verlagsgesellschaft Ritterbach.
- MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (HG.). (1999). *Sekundarstufe II – Gymnasium/Gesamtschule – Richtlinien und Lehrpläne: Chemie*. Frechen: Ritter Verlag.
- MONTAIGNE, M. (1998). *Essais*. [Essais, deutsch]. Übers. v. Stilett, H. Frankfurt am Main: Eichborn Verlag.
- MOORE, W. J. (1998). *Physikalische Chemie*. [Physical Chemistry, deutsch]. Bearbeitet v. HUMMEL, D. O. Berlin: de Gruyter Verlagshandlung.
- MORAN, P. J., GILEADI, E. (1989). "Alleviating the Common Confusion Caused by Polarity in Electrochemistry." *Journal of Chemical Education*. 66, 912-916.
- OGUDE, A. N., BRADLEY, J. D. (1994). "Ionic Conduction and Electrical Neutrality in Operating Electrochemical Cells – Pre-College and College Student Interpretations." *Journal of Chemical Education*, 71, 29-34.

- OGUDE, A. N., BRADLEY, J. D. (1996). "Electrode Processes and Aspects relating to Cell EMF, Current, and Cell Components in operating Electrochemical Cells." *Journal of Chemical Education*, 73, 1145-1149
- OSBORNE, J. F. (1996). "Beyond Constructivism." *Science Education*, 80, 53-82.
- OSTWALD, W. (1896). *Elektrochemie – ihre Geschichte und Lehre*. Leipzig: Veit & Comp.
- PINES, A. L., WEST, L. H. T. (1986). "Conceptual understanding and science learning: An interpretation of research within a sources-of-knowledge Framework." *Science Education*, 70, 583-604.
- PIOSK, R., JANSEN, W., PEPPER, R., FICKENFRERICH, H. (1991). "Die Fällungs- und Spannungsreihe der Metalle – Im Chemieunterricht und in der Geschichte." *Naturwissenschaft im Unterricht Chemie*. 2, 342-348.
- PURCELL, E. M. (1989). *Berkeley Physik Kurs 2 – Elektrizität und Magnetismus*. [Electricity and Magnetism – Berkeley Physics Course Volume 2, deutsch]. Übers. V. Gerstenhauer, E. Braunschweig: Vieweg.
- SANGER M. J., GREENBOWE T. J. (1997a). "Common Student Misconceptions in Electrochemistry: Galvanic, Electrolytic, and Concentration Cells." *Journal of Research in Science Teaching*, 34, 377-398.
- SANGER, M. J., GREENBOWE, T. J. (1997b). "Students' Misconceptions in Electrochemistry: Current Flow in Electrolyte Solutions and the Salt Bridge." *Journal of Chemical Education*, 74, 819-823.
- SCHERMER, F. J. (1991). *Lernen und Gedächtnis*. Stuttgart: Verlag Kolhammer.
- SCHMIDT, H.-J. (1997). "Students' Misconceptions – Looking for a Pattern." *Science Education*, 81, 123-135.
- SCHMIDT, H.-J. (1998). *Chemie 11 konkret*. Frankfurt a. M.: Verlag Moritz Diesterweg.
- SELLEY, N. (1997). "Thoughts on the research methodology for children's ideas in science: a reply to Sprod." *International Journal of Science Education*, 19, 741-742.

- SHUELL, T. J. (1987). "Cognitive Psychology and Conceptual Change: Implications for Teaching Science." *Science Education*, 71, 239-250.
- STAVER, J. R. (1998). "Constructivism: Sound Theory for Explaining the Practice of Science and Science Teaching" *Journal of Research in Science Teaching*, 35, 501-520.
- STENHOUSE, D. (1986). "Conceptual Change in Science Education: Paradigms and Language-Games" *Science Education*, 70, 413-425.
- STOCKLMAYER, S. M., TREAGUST, D. M. (1996). "Images of electricity: how do novices and experts model electric current?" *International Journal of Science Education*, 18, 163-178.
- SUMFLETH, E. (1992). "Schülervorstellungen im Chemieunterricht." *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht*, 45, 410-414.
- TALLANT, D. P. (1993). *A Review of Misconceptions of Electricity and Electrical circuits*. A paper presented to the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics, Cornell University, Ithaca, NY, August 1-4, 1993.
- THIELE, R. B., TREAGUST D. F. (1992). "Analogies in Senior High School Chemistry Textbooks: A Critical Analysis." In: SCHMIDT, H.-J. (Ed.). *Proceedings of the International Symposium: Empirical Research in Chemistry and Physics Education*. Hong Kong: International Council of Associations of Science Education.
- THIELE, R. B., TREAGUST D. F. (1995). "Analogies in chemistry textbooks." *International Journal of Science Education*. 17, 783-795.
- TOULMIN, S. E. (1991). *Kosmopolis: die unerkannten Aufgaben der Moderne* [*Cosmopolis. The Hidden Agenda of Modernity*, deutsch]. Übers. v. Vetter, H. Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag
- VAN DEN BERG, E., GROSHEIDE, W. (1997). "Learning and Teaching about energy, power, current and voltage." *School Science Review*, 78, 89-94.
- VETTER, K. J. (1961). *Elektrochemische Kinetik*. Berlin: Springer Verlag.

- VON RHÖNECK, C. (1986a). "Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand." *Naturwissenschaft im Unterricht - Physik/Chemie*, 34, 108-112.
- VON RHÖNECK, C. (1986b). "Problemlösen und Schülervorstellungen in der einfachen Elektrizitätslehre." *Physica didactica*, 13 (Sonderheft), 87-96.
- VON RHÖNECK, C. (1988a). "Aufgaben zum Spannungsbegriff." *Naturwissenschaft im Unterricht Physik/Chemie*, 36, 38-42.
- VON RHÖNECK, C. (1988b). "Wege zum Spannungsbegriff." *Naturwissenschaft im Unterricht Physik/Chemie*, 31, 4-13.
- VON RHÖNECK, C., VÖLKER, B. (1984). "Vorstellungen vom Stromkreis und ihr Einfluß auf den Lernprozeß." *Der Physikunterricht*, 18, 4-15.
- WHEATLEY, G. H. (1991). "Constructivist Perspectives on Science and Mathematics Learning." *Science Education*, 75, 9-21.
- ZIMBARDO, P. G. (1995). *Psychologie*. Berlin: Springer Verlag.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aussagen, die mit der Schüler- Energiebetrachtung verträglich sind (nach VON RHÖNECK & VÖLKER, 1984).....	37
Abbildung 2: Ein Quelle-Verbraucher-Modell einfacher Stromkreise (ANDERSSON, 1984).....	38
Abbildung 3: Planung der Interviews	45
Abbildung 4: Zeitlicher Ablauf der Interviews	50
Abbildung 5: Die im Interview verwendeten Skizzen.....	54
Abbildung 6: Verlauf der Datenanalyse.....	61
Abbildung 7: Elektronenfluß im äußeren Stromkreis nach dem <i>Quelle-Verbraucher-Modell</i> (S1).....	106
Abbildung 8: "Creatures with energy" (VAN DEN BERG & GROSHEIDE, 1997).....	116
Abbildung 9: Energiefluß aus dem elektromagnetischen Feld in den Draht (BRANDT & DAHMEN, 1986, Seite 449)	118
Abbildung 10: Beschriftung der Elektrolysezelle mit Plus und Minus (links:S4, S10 / rechts S7, S9)	150
Abbildung 11: Zwei unterschiedliche Schaltzeichen für eine Spannungsquelle	206

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kategorisierung der " <i>misconceptions</i> " von GARNETT & TREAGUST (1992a;b).....	20
Tabelle 2: Zusätzliche Kategorien von SANGER & GREENBOWE (1997a;b)	21
Tabelle 3: Themen, die Schülern Probleme bereiten (OGUDE & BRADLEY, 1994)	21
Tabelle 4: Von Schülern als besonders schwierig erachtete Konzepte der Schulchemie, die mit Elektrochemie zu tun haben (BUTTS & SMITH, 1987a).....	24
Tabelle 5: Verwendung von Begriffen in Schulbüchern (Zusammenfassung der Ergebnisse von MAROHN, 1999, Seiten 89ff, 114ff)...	29
Tabelle 6: Zugehörigkeit der Schüler zu den Chemiekursen	47
Tabelle 7: Der Interviewplan.....	49
Tabelle 8: Arten von Kategorien bei der <i>zusammenfassenden Inhaltsanalyse</i>	63
Tabelle 9: Kategorisierung der Aussagen aus den Argumentationssträngen. ...	71
Tabelle 10: 'Geschichten' zur Darstellung der Ergebnisse	72
Tabelle 11: Zusammenhang zwischen der Ladung der Elektrode und der Elektrodenreaktion.....	86
Tabelle 12: Zusammenhang zwischen der Ladung der Elektrode und der Elektrodenreaktion (S8)	87
Tabelle 13: Beschreibung einer zeitlichen Abfolge für die galvanische Zelle (S2).....	94
Tabelle 14: Beschreibung einer zeitlichen Abfolge für die Elektrolysezelle (S2).....	96
Tabelle 15: Die von den Schülern im Interview verwendeten Perspektiven ..	202

13 Verzeichnis der Stellungnahmen

Stellungnahme 1: Energiespeicherung in elektrochemischen Zellen	80
Stellungnahme 2: Unübersichtlichkeit durch die Beschreibung von Hin- und Rückreaktionen	88
Stellungnahme 3: Unterschiedliche Reaktionen an Elektroden mit der gleichen Ladung	90
Stellungnahme 4: Unterscheidung zwischen Startvorgang und stationärem Zustand.....	111
Stellungnahme 5: Zeitliche Abfolge und "Deswegen-Prinzip"	112
Stellungnahme 6: Erfordernisse für das Verständnis der Tatsache, daß durch den inneren Stromkreis keine Elektronen fließen.....	114
Stellungnahme 7: Ein Elektronenfluß ist in der Chemie das gleiche wie in der Physik	115
Stellungnahme 8: Beschreibung der Schulelektrochemie ist mit dem Strombegriff möglich.....	120
Stellungnahme 9: Schwierigkeiten mit der elektrolytischen Dissoziation.....	129
Stellungnahme 10: Annahme eines Elektronenflusses durch den inneren Stromkreis hat Folgen	133
Stellungnahme 11: Problem: in einer galvanischen Zelle bewegen sich negative Ionen zur negativen Elektrode.....	135
Stellungnahme 12: Diaphragma oder Salzbrücke?	142
Stellungnahme 13: Wie kann eine Trennwand, die Ionen durchläßt, verhindern, daß sich die Lösungen mischen?.....	144
Stellungnahme 14: Was verbirgt sich hinter dem Diaphragma?	145
Stellungnahme 15: Elektronenfluß im Diaphragma \neq Elektronenfluß in den Lösungen.....	146
Stellungnahme 16: Pole in der Physik	161
Stellungnahme 17: Pole in der Elektrochemie	164
Stellungnahme 18: 'Minuspol' und 'Pluspol' sind nicht mit der Stromrichtung verknüpft	167
Stellungnahme 19: Eine Folge der Verwechslung eines stationären Zustandes mit einem Startvorgang	167

Stellungnahme 20: <i>Lokale Argumentation</i> führt zu einer falschen Beschriftung der Elektrolysezelle.....	169
Stellungnahme 21: Definition der Begriffe 'Anode' und 'Kathode' und deren Unterschied zu 'Minuspol' und 'Pluspol'.....	175
Stellungnahme 22: Schülerdefinitionen für 'Anode' und 'Kathode'.....	179
Stellungnahme 23: Verwendung der Begriffe 'Anode' und 'Kathode' im Unterricht	181
Stellungnahme 24: Beide Begriffspaare – 'Anode', 'Kathode' und 'Pluspol', 'Minuspol' – verwenden	182
Stellungnahme 25: Unterscheidung einer Elektrolysezelle von einer galvanischen Zelle	183
Stellungnahme 26: <i>Kritische Attribute</i> , die Schüler dem Begriff 'Elektrolyse' zuordnen	183
Stellungnahme 27: <i>Begriffsbildung</i> anhand von Beispielen.....	184
Stellungnahme 28: Strömungen können aus unterschiedlichen Perspektiven beschrieben werden.....	203
Stellungnahme 29: Perspektivenwechsel stellen ein Kommunikations- problem dar, sind aber nicht immer vermeidbar	205

14 Anhang

14.1 Die Kategorien der zusammenfassenden Inhaltsanalyse

Hier werden die Kategorien angegeben, nach denen die Interviews bei der *zusammenfassenden Inhaltsanalyse* (s. Kap. 4.4.1) codiert wurden.

Schüler	Kategorien
1	1) Allgemeines 2) Elektrodenprozesse 2 ^Z) Zinkelektrode 2 ^C) Kupferelektrode 3) Elektrolyte 4) Diaphragma 5) Äußerer Stromkreis 6) Perspektive der Beschreibung 7) Chemisches Gleichgewicht 9) Benutzung von Begriffsnamen
2	1) Allgemeines 2) Elektrodenprozesse 2 ^Z) Zinkelektrode 2 ^C) Kupferelektrode 3) Elektrolyte 4) Diaphragma 5) Äußerer Stromkreis 6) Perspektive der Beschreibung 7) Pluspol / Minuspol & positiv / negativ 8) Deutung von Reaktionsgleichungen 9) Benutzung von Begriffsnamen
3	1) Allgemeines 2) Elektrodenprozesse 2 ^Z) Zinkelektrode 2 ^C) Kupferelektrode 3) Elektrolyte 3 ^L) Leitungsmechanismus im Elektrolyten 4) Diaphragma 5) Äußerer Stromkreis 6) Perspektive der Beschreibung 6 ^A) Aufnahme / Abgabe

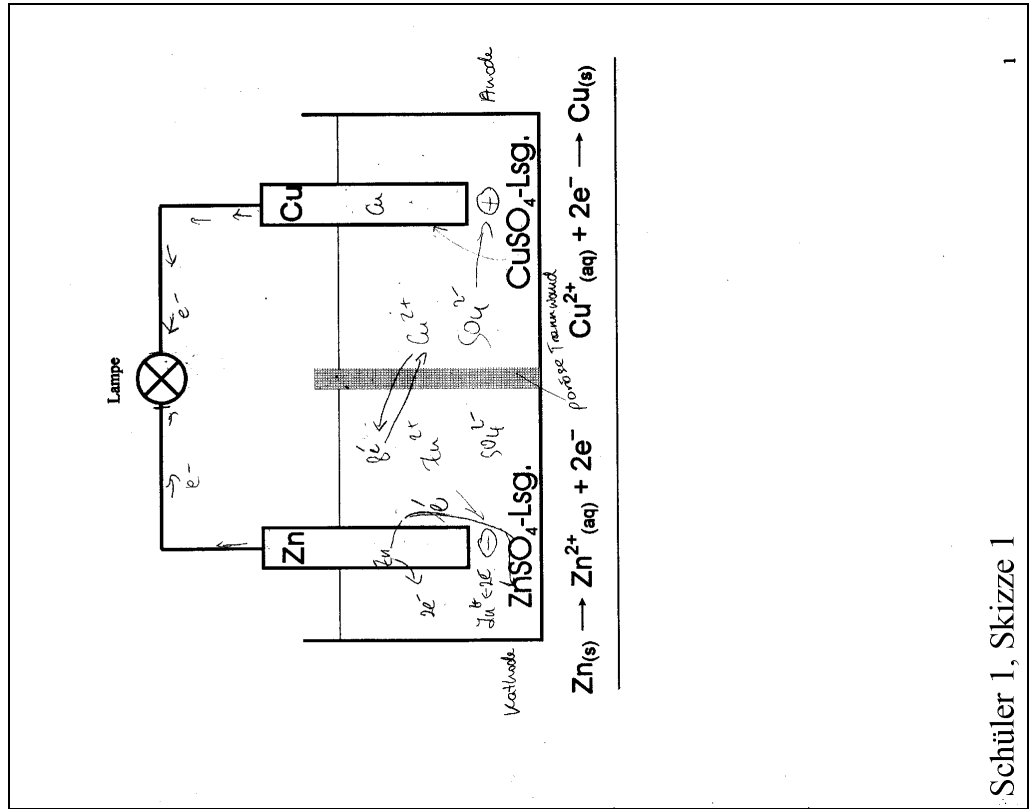
	<p>7) Pluspol / Minuspol & Kathode / Anode 7^P) Pluspol / Minuspol 7^K) Kathode / Anode</p> <p>8) Deutung von Reaktionsgleichungen</p> <p>9) Benutzung von Begriffsnamen</p>
4	<p>1) Allgemeines 1^B) Beschreibung der Zellen als Ganzes 1^V) Vergleich der Zellen</p> <p>2) Elektrodenprozesse 2^Z) Zinkelektrode 2^C) Kupferelektrode</p> <p>3) Elektrolyte 3^D) Woher kommen die Ionen in der Lösung? 3^L) Leitungsmechanismus im Elektrolyten</p> <p>4) Diaphragma</p> <p>5) Äußerer Stromkreis 5^V) Stromverbrauchsvorstellung 5^L) Leitungsmechanismus im Draht</p> <p>6) Perspektive der Beschreibung 6^P) Pluspol / Minuspol 6^T) Elektronentransfer (z. B. Aufnahme / Abgabe)</p> <p>7) Bewegung von Ladungen durch die Zelle 7^E) Elektronen 7^I) Ionen</p> <p>8) Benutzung von Begriffsnamen</p>
5	<p>1) Allgemeines 1^B) Beschreibung der Zellen als Ganzes 1^V) Vergleich der Zellen</p> <p>2) Elektrodenprozesse 2^Z) Zinkelektrode 2^C) Kupferelektrode</p> <p>3) Elektrolyte 3^L) Leitungsmechanismus im Elektrolyten</p> <p>4) Diaphragma</p> <p>5) Äußerer Stromkreis</p> <p>6) Perspektive der Beschreibung 6^P) Pluspol / Minuspol</p> <p>7) Versuch, die Richtung der Reaktionsgleichungen in Skizze 2 zu begründen</p> <p>8) Benutzung von Begriffsnamen</p>

6	<ol style="list-style-type: none"> 1) Allgemeines <ol style="list-style-type: none"> 1^{B)} Beschreibung der Zellen als Ganzes 1^{V)} Vergleich der Zellen 2) Elektrodenprozesse <ol style="list-style-type: none"> 2^{Z)} Zinkelektrode 2^{C)} Kupferelektrode 3) Elektrolyte <ol style="list-style-type: none"> 3^{I)} Ionen in der Lösung 3^{L)} Leitungsmechanismus im Elektrolyten 4) Diaphragma 5) Äußerer Stromkreis <ol style="list-style-type: none"> 5^{Q)} Quelle (Skizze 2) 6) Perspektive der Beschreibung <ol style="list-style-type: none"> 6^{P)} Pluspol / Minuspol 7) Ladungstransport in den Zellen 8) Argumentation über edel / unedel oder über die Spannungsreihe 9) Reaktionsgleichungen als Ausgangspunkt der Argumentation 10) Benutzung von Begriffsnamen
7	<ol style="list-style-type: none"> 1) Allgemeines <ol style="list-style-type: none"> 1^{B)} Beschreibung der Zellen als Ganzes 1^{V)} Vergleich der Zellen 1^{D)} Debriefing - Validierung 2) Elektrodenprozesse <ol style="list-style-type: none"> 2^{Z)} Zinkelektrode 2^{C)} Kupferelektrode 3) Elektrolyte <ol style="list-style-type: none"> 3^{L)} Leitungsmechanismus im Elektrolyten 4) Diaphragma 5) Äußerer Stromkreis <ol style="list-style-type: none"> 5^{Q)} Quelle (Skizze 2) 6) Positiv / negativ & Kathode / Anode <ol style="list-style-type: none"> 6^{L)} Positiv / negativ – Lösung 6^{P)} Pluspol / Minuspol – bezogen auf Elektroden bzw. Quelle 6^{K)} Kathode / Anode – bezogen auf Elektroden 7) Transportvorgänge <ol style="list-style-type: none"> 7^{S)} Stromfluß / Stromkreis / Elektronenfluß 7^{L)} Ladungsausgleich / Ladungstransport 8) Benutzung von Begriffsnamen
8	<ol style="list-style-type: none"> 1) Allgemeines

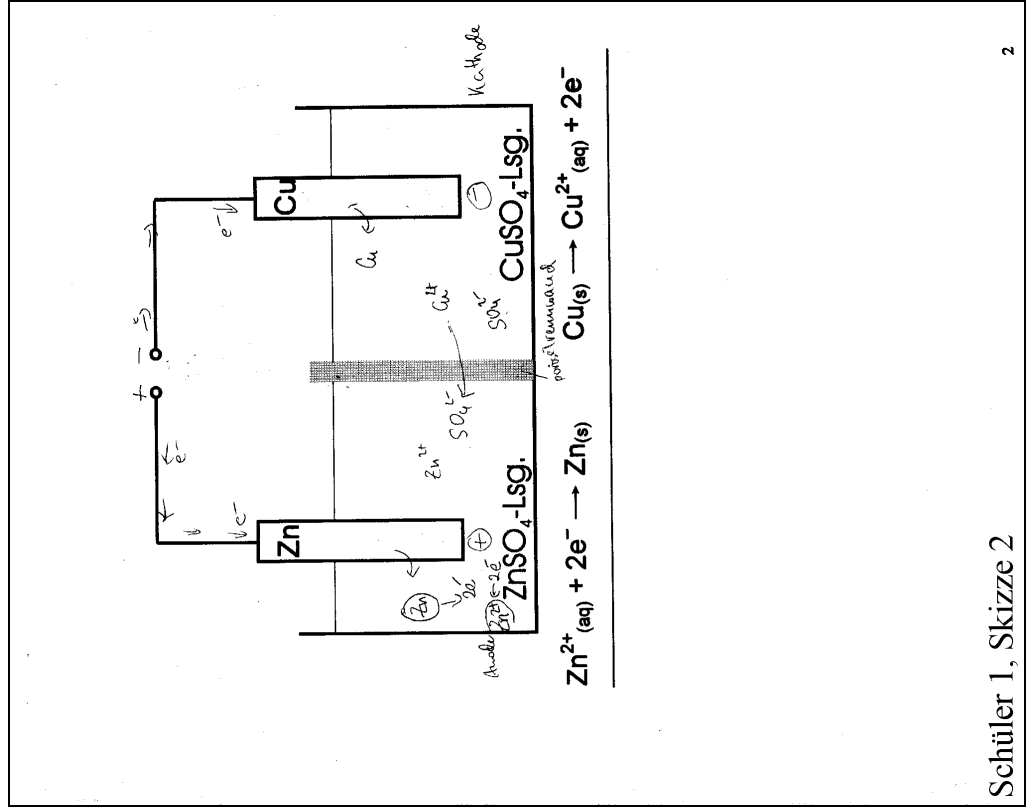
	<ul style="list-style-type: none"> 1^B) Beschreibung der Zellen als Ganzes 1^V) Vergleich der Zellen 1^D) Debriefing – Validierung 2) Elektrodenprozesse <ul style="list-style-type: none"> 2^Z) Zinkelektrode 2^C) Kupferelektrode 3) Elektrolyte 4) Diaphragma 5) Äußerer Stromkreis <ul style="list-style-type: none"> 5^Q) Quelle (Skizze 2) 6) Pluspol / Minuspol & Kathode / Anode <ul style="list-style-type: none"> 6^P) Pluspol / Minuspol 6^K) Kathode / Anode 7) Transportvorgänge <ul style="list-style-type: none"> 7^E) Elektronenwanderung 7^L) Ladungsausgleich 8) Benutzung von Begriffsnamen
9	<ul style="list-style-type: none"> 1) Allgemeines <ul style="list-style-type: none"> 1^B) Beschreibung der Zelle als Ganzes 1^V) Vergleich der Zellen 1^D) Debriefing – Validierung 2) Elektrodenprozesse <ul style="list-style-type: none"> 2^Z) Zinkelektrode 2^C) Kupferelektrode 3) Elektrolyte <ul style="list-style-type: none"> 3^L) Leitungsmechanismus im Elektrolyten 4) Diaphragma 5) Äußerer Stromkreis 6) Pluspol / Minuspol & Kathode / Anode <ul style="list-style-type: none"> 6^P) Pluspol / Minuspol 6^K) Kathode / Anode 7) Transportvorgänge <ul style="list-style-type: none"> 7^E) Elektronenwanderung 7^L) Ladungsausgleich 8) Ursache der Reaktionen 9) Chemisches Gleichgewicht 10) Benutzung von Begriffsnamen
10	<ul style="list-style-type: none"> 1) Allgemeines <ul style="list-style-type: none"> 1^B) Beschreibung der Zelle als Ganzes

1 ^V)	Vergleich der Zellen
1 ^D)	Debriefing – Validierung
2)	Elektrodenprozesse
2 ^Z)	Zinkelektrode
2 ^C)	Kupferelektrode
3)	Elektrolyte
3 ^L)	Leitungsmechanismus im Elektrolyten
4)	Diaphragma
5)	Äußerer Stromkreis
6)	Pluspol / Minuspol & Kathode / Anode
6 ^L)	Lösung positiv / negativ
6 ^P)	Pluspol / Minuspol
6 ^K)	Kathode / Anode
7)	Transportvorgänge
7 ^E)	Elektronenwanderung
7 ^V)	Stromverbrauchsvorstellung
7 ^I)	Ionenbewegung
8)	Ursache (Potentialdifferenz, Ruhepotential, Fällungsreihe, Quelle)
9)	"Deswegen-Prinzip"
10)	Benutzung von Begriffsnamen

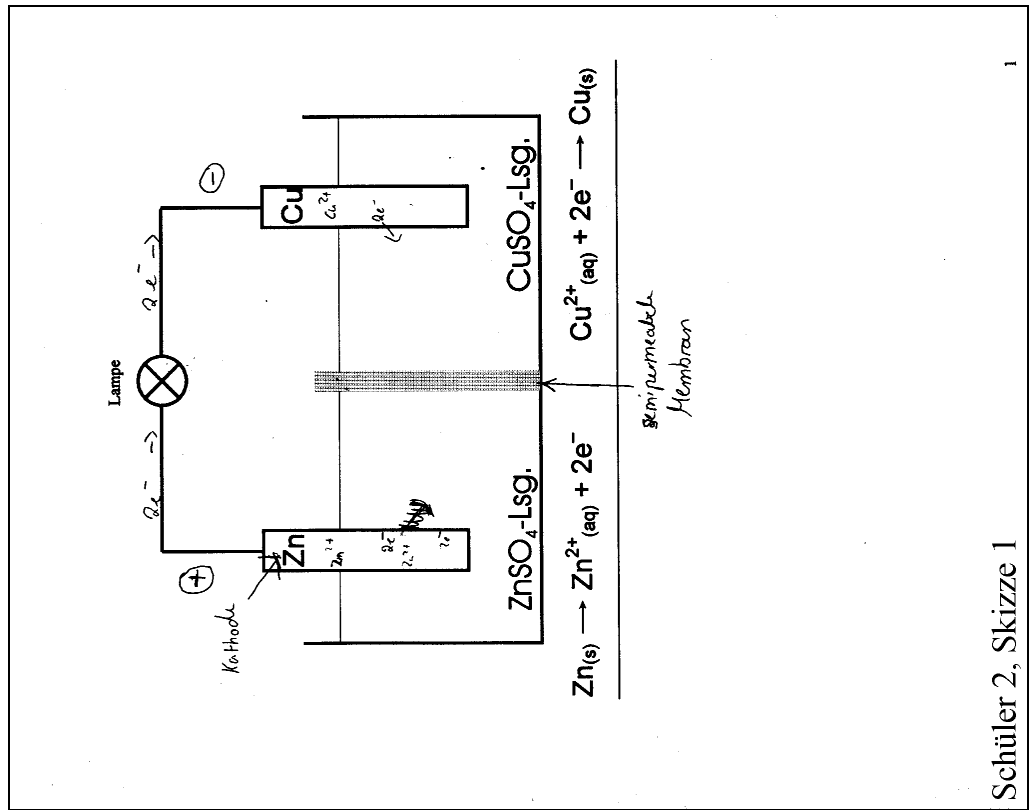
14.2 Die in den Interviews verwendeten Skizzen



Schüler 1, Skizze 1

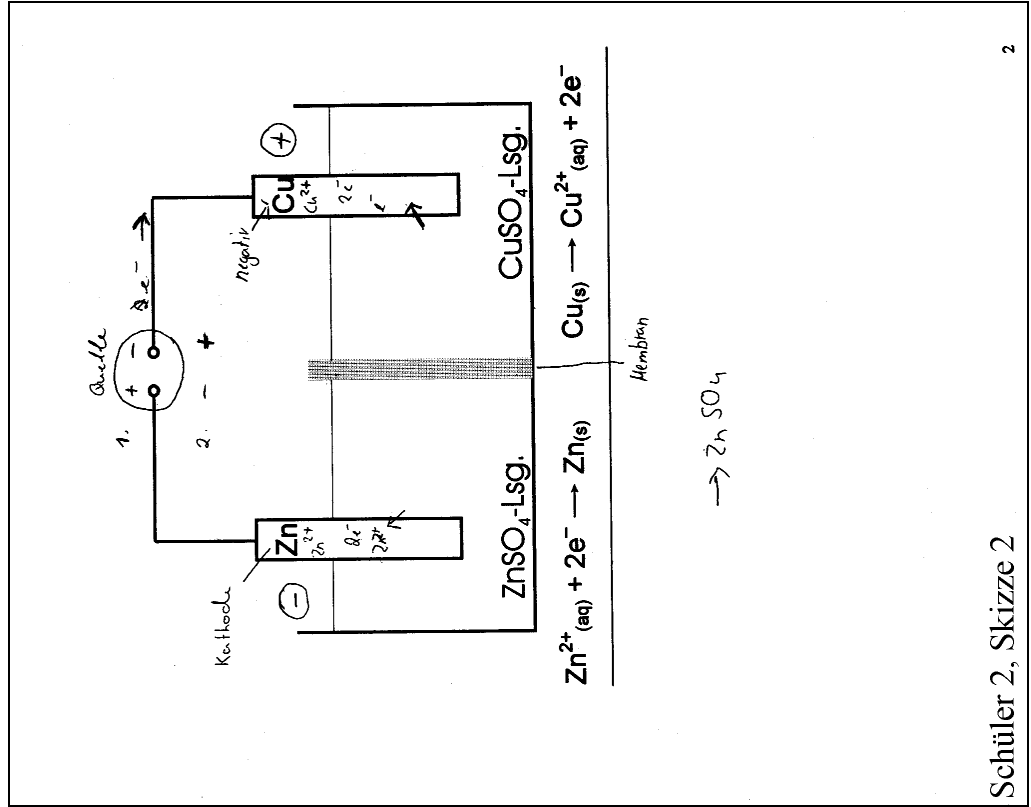


Schüler 1, Skizze 2



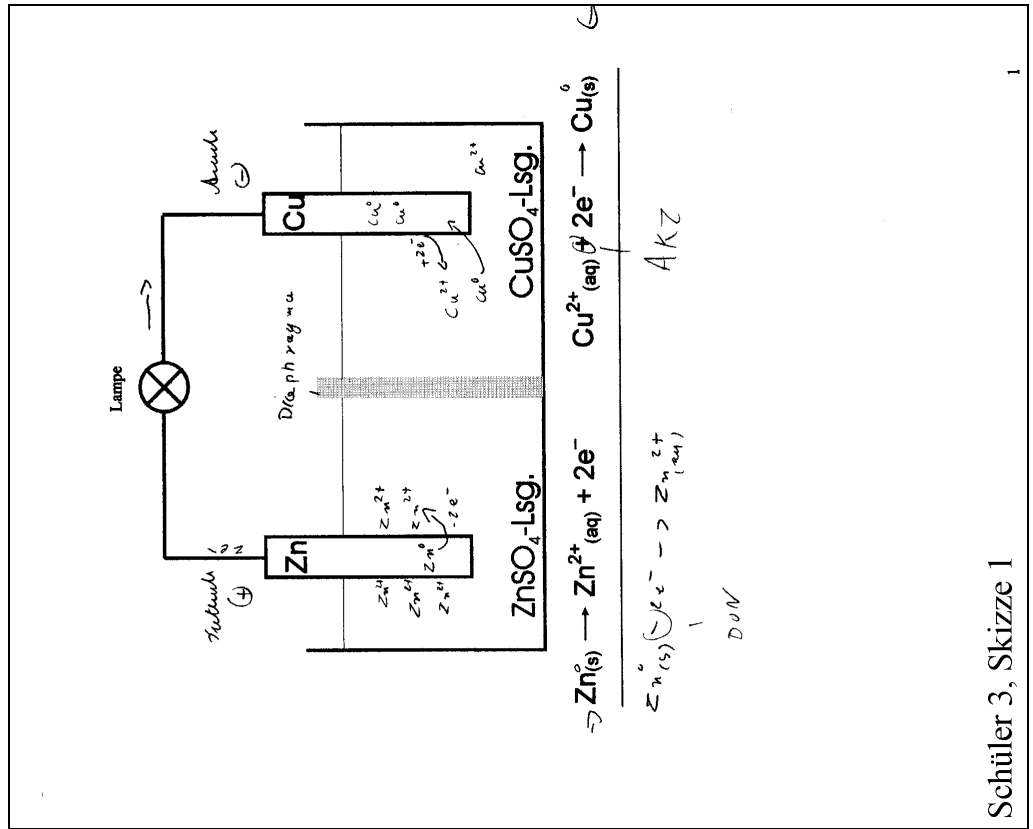
Schüler 2, Skizze 1

1

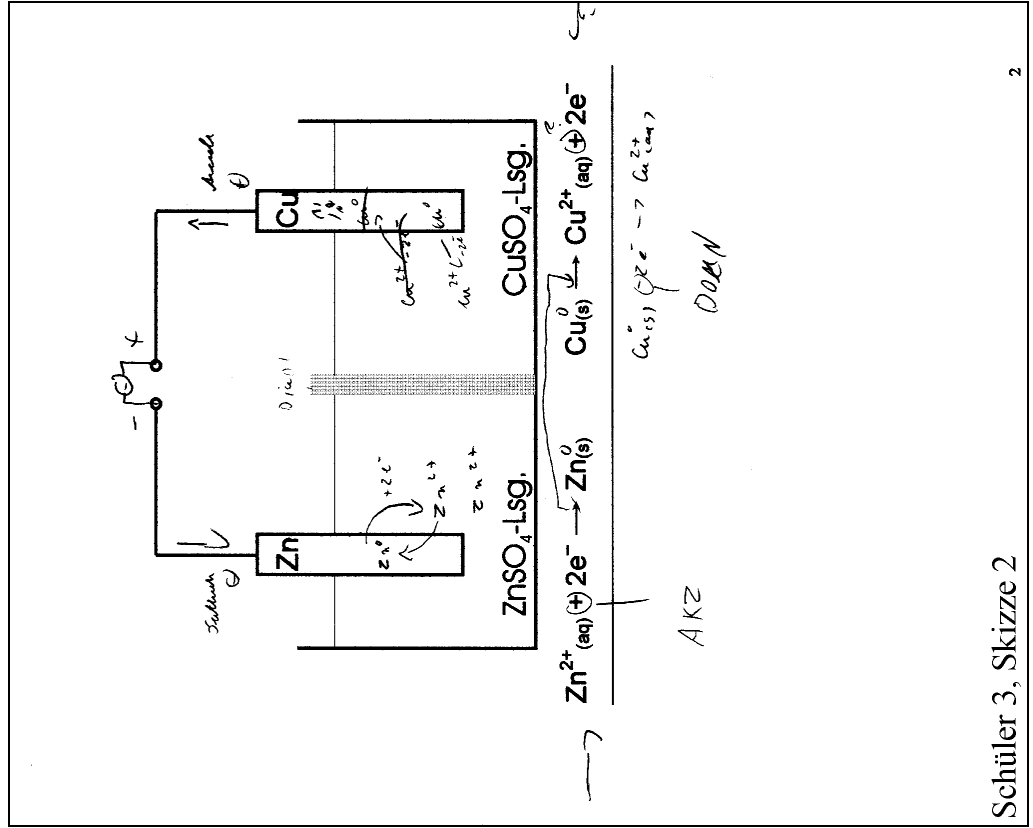


Schüler 2, Skizze 2

2



Schüler 3, Skizze 1



Schüler 3, Skizze 2

Galvanische Zelle + Voltmeter

$Zn(s) \rightarrow Zn^{2+}(aq) + 2e^-$

 $Cu^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Cu(s)$

Elektrolyt
 Spannungquelle
 Elektroden
 Diaphragma
 e-Transport
 Zn-Sulfid
 Cu
 CuSO₄-Lsg.
 ZnSO₄-Lsg.
 Salzbrücke

Elektronen Donator
 Donatorhalbzelle
 Anode / Pluspol
 anodische Reaktion

Ladungsstrom
 Elektronenakzeptor
 Akzeptorhalbzelle
 Kathode / Minuspol
 kathodische Reaktion

Überspannung: ... unedlere Metalle geben leichter Elektronen ab / Oxidieren

Schüler 4, Skizze 1

$Zn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Zn(s)$

 $Cu(s) \rightarrow Cu^{2+}(aq) + 2e^-$

Elektrolyt
 Spannungsquelle
 Voltmeter
 Elektroden
 Diaphragma
 e-Transport
 Zn-Sulfid
 Cu
 CuSO₄-Lsg.
 ZnSO₄-Lsg.
 Elektrolysebecken

Akzeptorhalbzelle
 Elektronenakzeptor
 Kathode / Minuspol
 Kathodische Reaktion

Donatorhalbzelle
 Elektronendonator
 Anode / Pluspol
 anodische Reaktion

Schüler 4, Skizze 2

$Zn^{2+}_{(aq)} + 2e^{-} \rightarrow Zn_{(s)}$

Schüler 5, Skizze 2

2

$Zn_{(s)} \rightarrow Zn^{2+}_{(aq)} + 2e^{-}$

Schüler 5, Skizze 1

1

$Zn(s) \rightarrow Zn^{2+}(aq) + 2e^-$ Oxidation
 $Cu^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Cu(s)$ Reduktion

$Zn^{2+} + SO_4^{2-}$

1

Schüler 6, Skizze 1

$Zn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Zn(s)$ Reduktion
 $Cu(s) \rightarrow Cu^{2+}(aq) + 2e^-$ Oxidation

$Cu^{2+} + SO_4^{2-}$

2

Schüler 6, Skizze 2

Galvanisches Element (Daniell-Element)

$Zn(s) \rightarrow Zn^{2+}(aq) + 2e^-$ *Anode*

$Cu^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Cu(s)$ *Kathode*

Autoprotolyse

$H^+ \rightleftharpoons H^+$

Cu

Zn

Schüler 7, Skizze 1

1

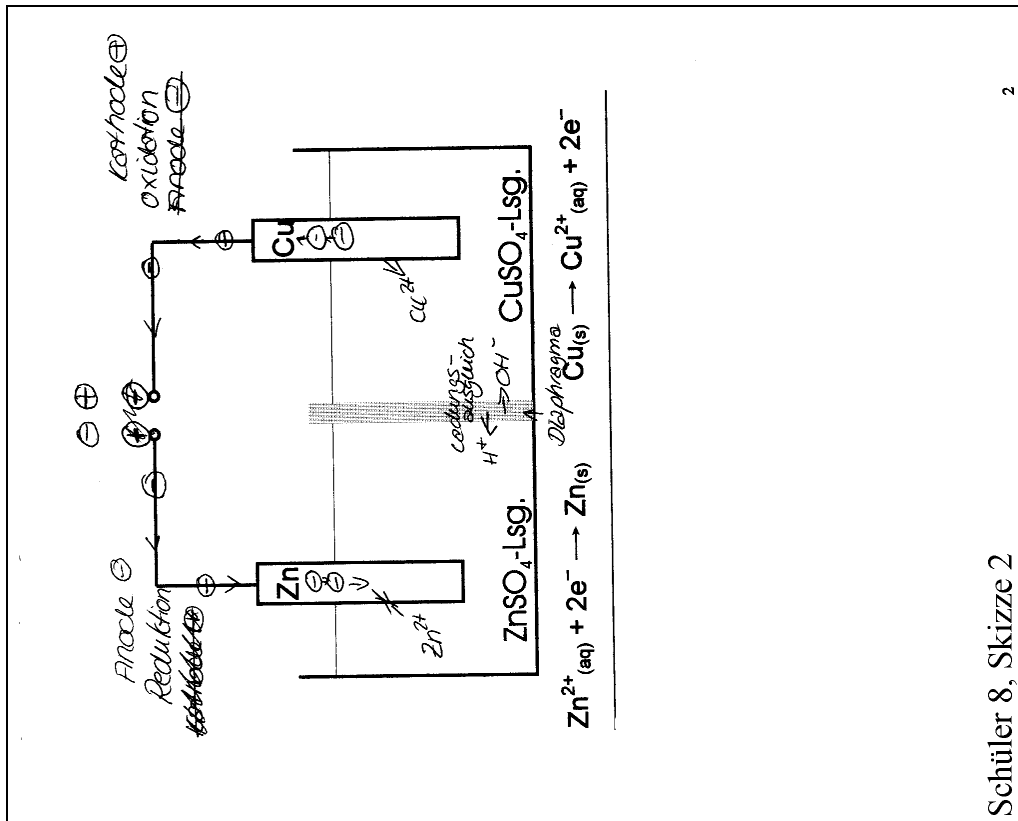
Elektrolyse

$Zn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Zn(s)$ *Kathode*

$Cu(s) \rightarrow Cu^{2+}(aq) + 2e^-$ *Anode*

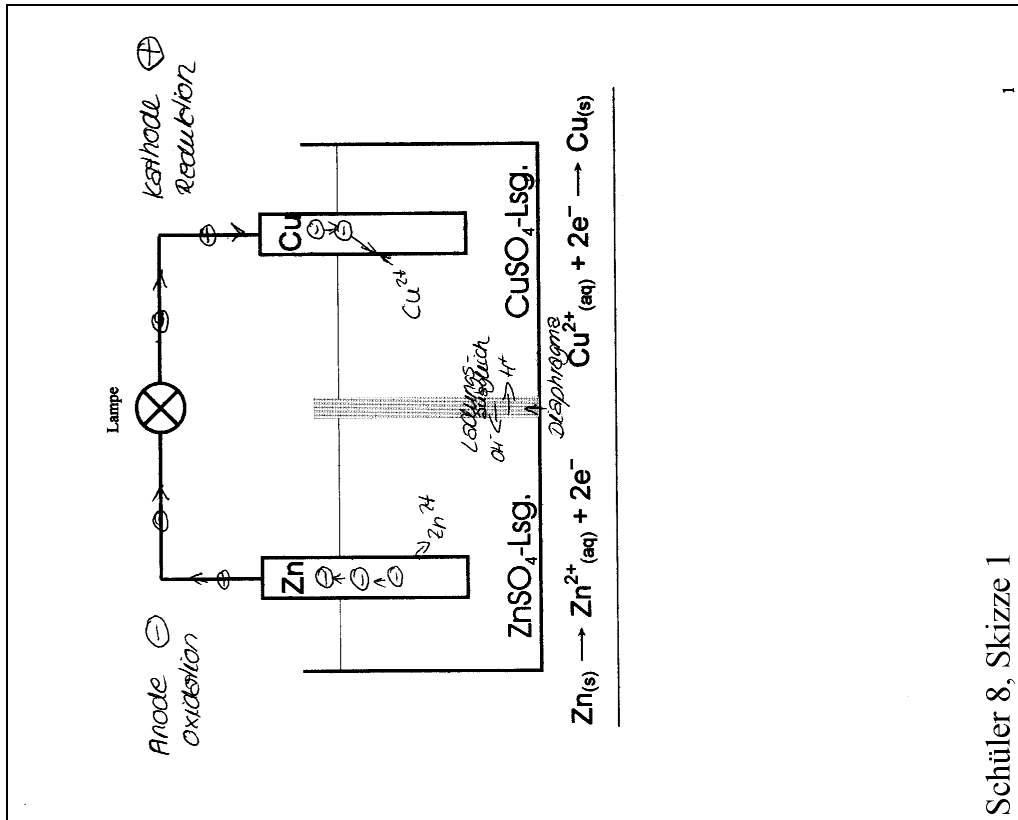
Schüler 7, Skizze 2

2



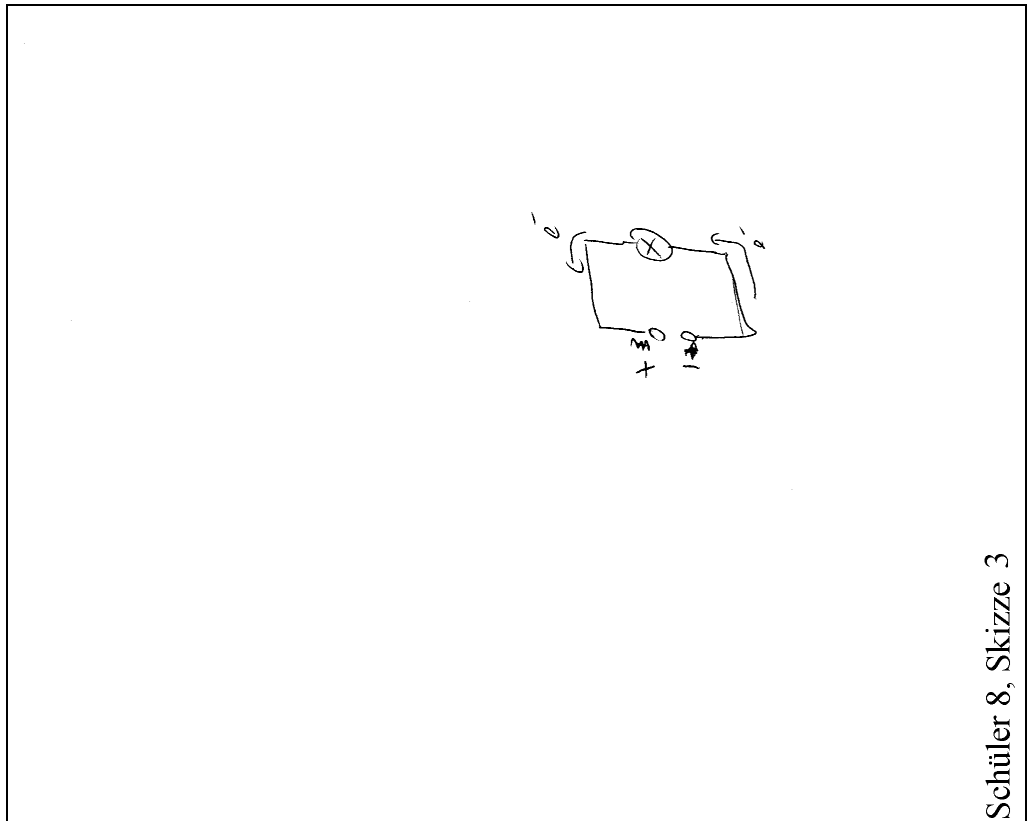
Schüler 8, Skizze 2

2

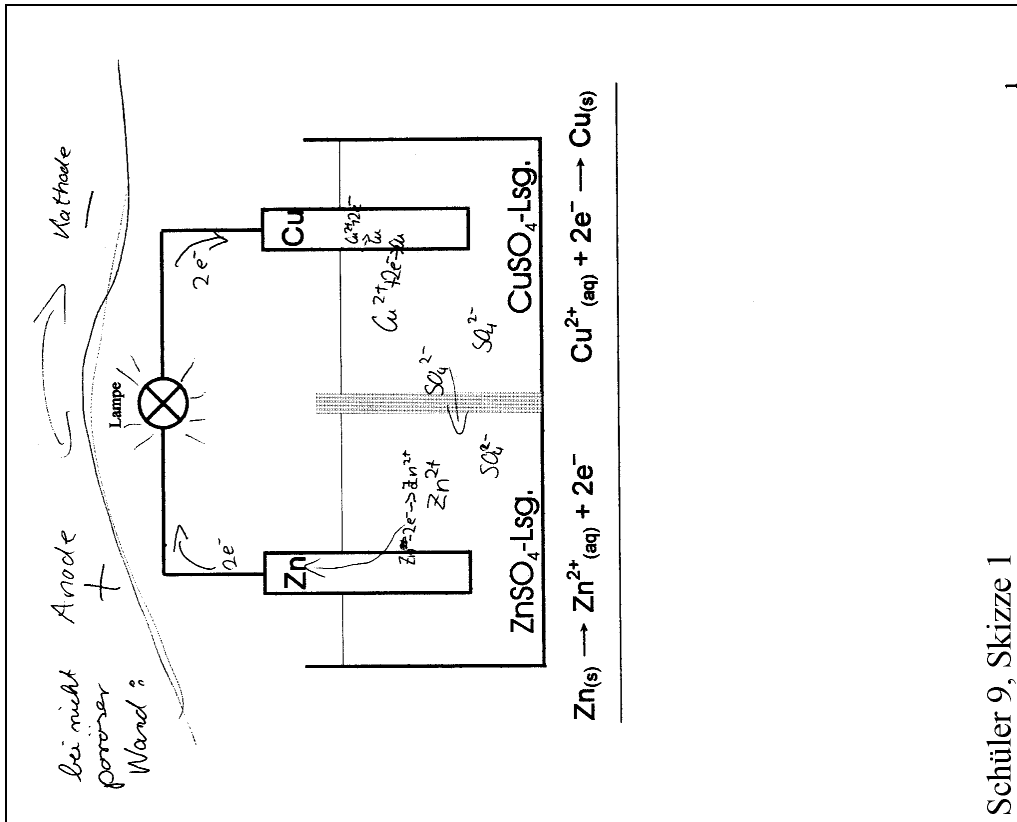


Schüler 8, Skizze 1

1

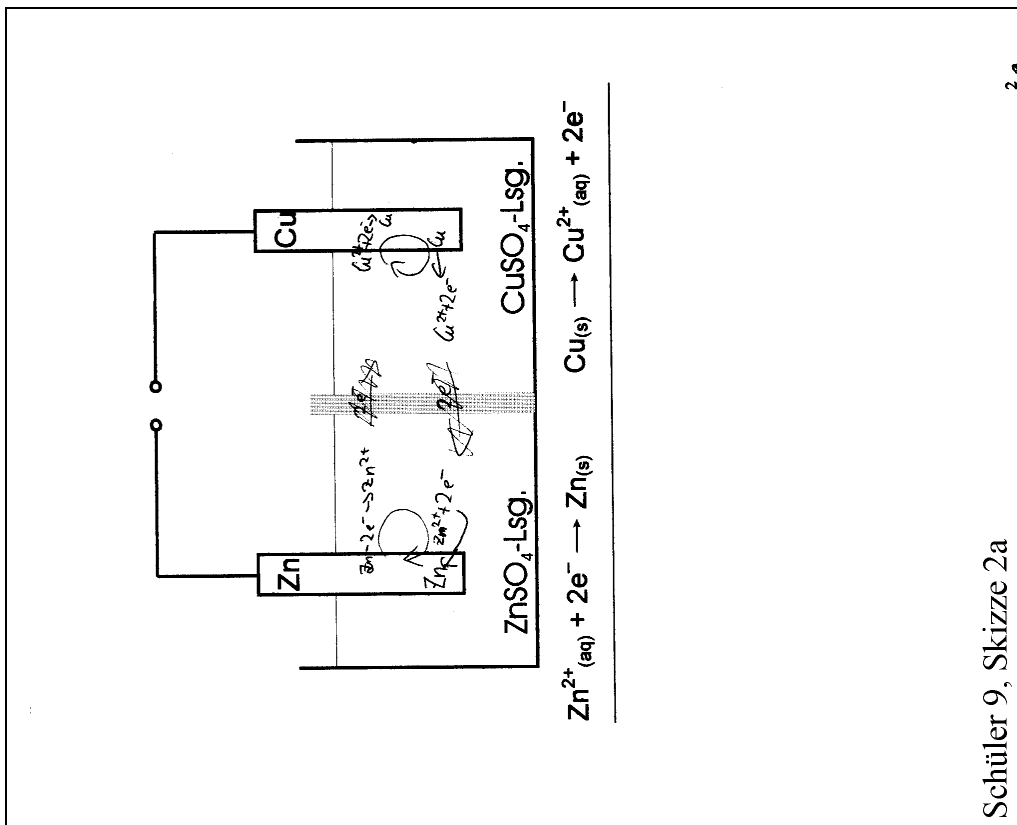


Schüler 8, Skizze 3



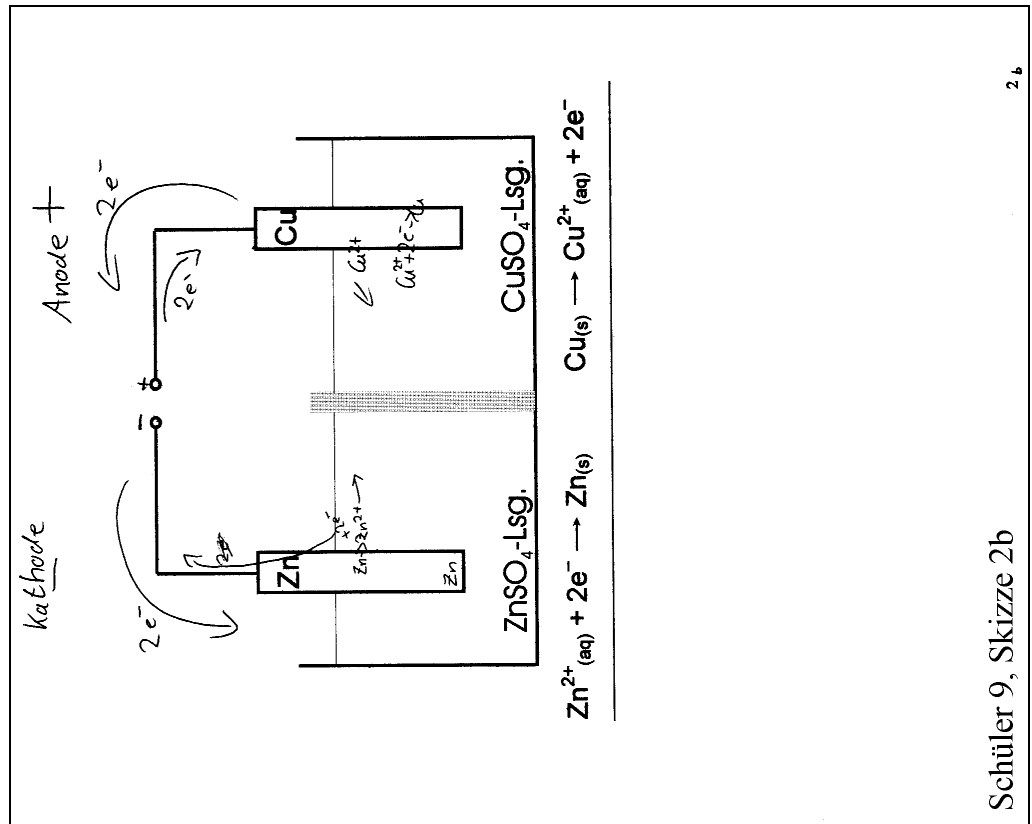
Schüler 9, Skizze 1

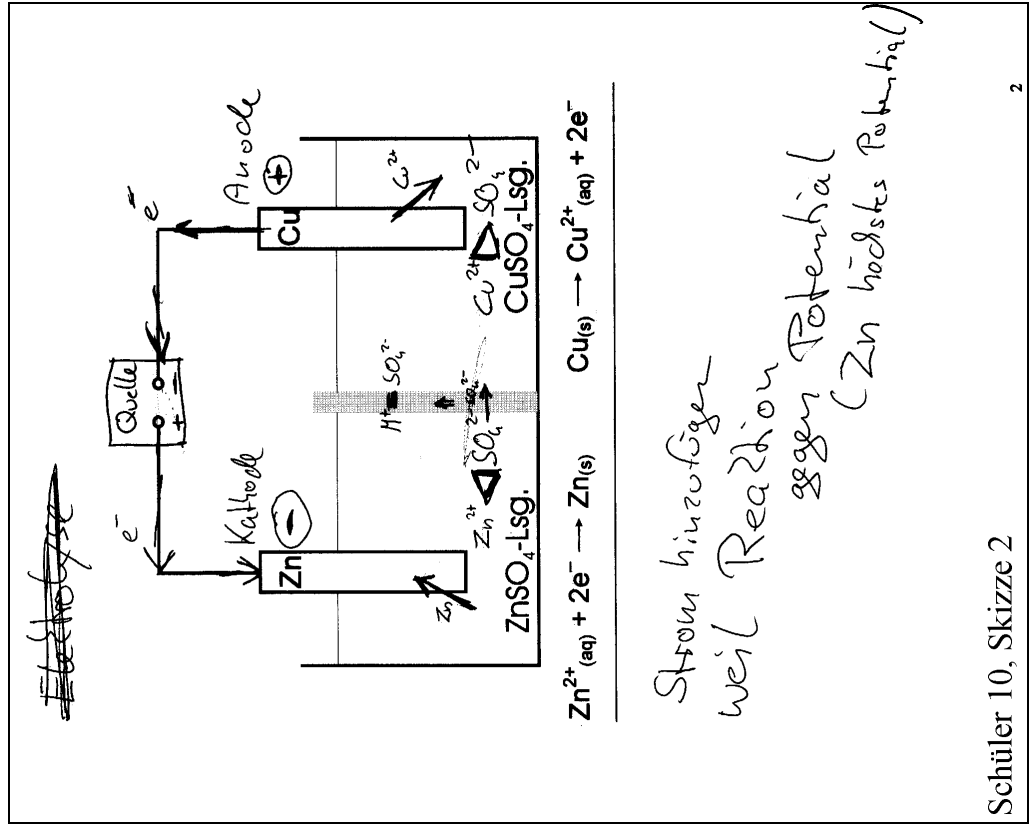
1



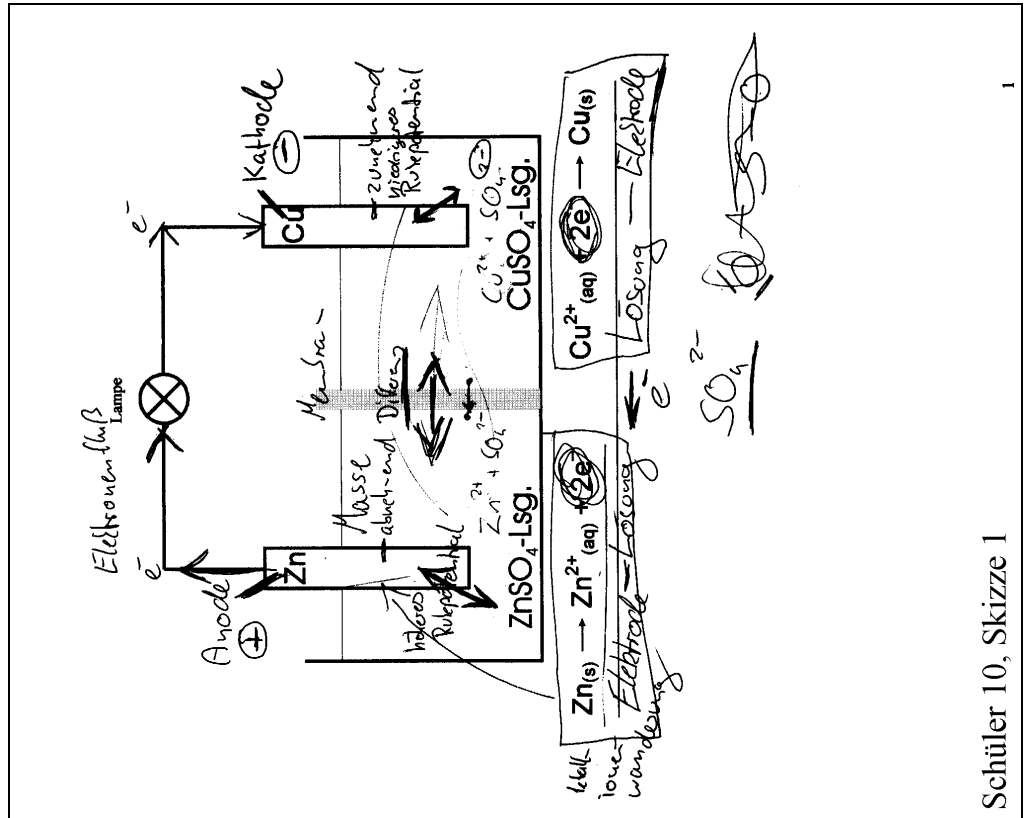
Schüler 9, Skizze 2a

2 a





Schüler 10, Skizze 2



Schüler 10, Skizze 1