

## Die richtige Vorstellung vom elektrischen Strom

Markus Kühn

Universität des Saarlandes, Campus A5 1, 66123 Saarbrücken  
E-mail: m.kuehn@mx.uni-saarland.de

### Kurzfassung

Die für elektrische Stromkreise verbreitete Wasserkreisanalgie wird mit deren Anschaulichkeit erklärt. Respektive Ursache und Wirkung entsprechen Ladung, Spannung und Stromstärke im elektrischen System hier Volumen, Druckdifferenz und Volumenstrom. Den drei elementaren Baugliedern Widerstand, Kondensator und Spule stehen lediglich Rohrleitung und Behälter gegenüber. Ein analoges Element zur Spule, welche Energie im magnetischen Feld speichert, fehlt. Mit bewegten Ladungen verbundene magnetische Felder bleiben unberücksichtigt. Die Analogie Kondensator-Wasserbehälter ist zumindest hinsichtlich der Kräfte zwischen den Platten fragwürdig, da auch elektrische Felder im Modell nicht berücksichtigt werden. Überhaupt kann eine Wasserkreisanalgie auf dem Fundament von positiven und negativen Ladungen nicht aufsetzen. Der Wasserkreisanalgie wird eine multimediale "Bottom up" Strategie ausgehend von beiden Ladungssorten und ihren Feldern gegenübergestellt. Die Kontaktierung geladener Kondensatorplatten mit unterschiedlichen Materialien leitet zu Widerstand und Strömungsfeld über. Dem sich entladenden Kondensator wird die Batterie gegenübergestellt, die permanent Ladungen nachliefert. Zur nachhaltigen Illustration der zugrundeliegenden Physik dienen Animationen, Videos und interaktive Experimente. Fehlinterpretationen aus der Wasserkreisanalgie können vermieden werden: Den Rotor eines Elektromotors z. B. treibt der elektrische Strom nicht wie strömendes Wasser ein Laufrad an, sondern über sein Feld.

### 1. Elektrischer Stromkreis und Wasserkreisanalgie

Die Wasseranalgie zum elektrischen Stromkreis ist eine aufgrund ihrer postulierten Anschaulichkeit weit verbreitete Proportionalitätsanalgie. Gemäß der Kantischen Definition handelt es sich hierbei um „eine vollkommene Ähnlichkeit zweier Verhältnisse zwischen ganz unähnlichen Dingen“ [1].

In diesem Zusammenhang weist Poser [1] darauf hin, dass die „grundsätzliche Verschiedenheit der beiden aufeinander bezogenen Bereiche“ immer mitgedacht werden muss. Der Vergleich bezieht sich ausdrücklich nur auf Verhältnisse, die beiden Bereiche selbst können nicht unmittelbar verglichen werden. „Analogie bedeutet deshalb zugleich immer auch Differenz“ [1]. In [2] wird ferner darauf hingewiesen, dass die Verwendung von Analogien im Unterricht immer bedeutet „einen Umweg zu machen“.

Indem von Bekanntem auf Unbekanntes geschlossen wird sollen Schüler unter Zuhilfenahme der Wasserkreisanalgie eine Vorstellung vom elektrischen Strom bekommen. Nach Abb. 1 bestehen zwischen dem einfachen elektrischen Stromkreis und dem Wasserkreis folgende Analogien: Dem elektrischen Leiter entspricht die Rohrleitung bzw. der Wasserschlauch. Die Funktion der Batterie wird im Wasserkreis durch eine Pumpe übernommen. Schalter

und Motor haben die analogen Elemente Ventil und Turbine bzw. Wasserrad.

Respektive Ursache und Wirkung entsprechen Ladung  $Q$ , Potentialunterschied  $\Delta\phi$  und Stromstärke  $I$  im elektrischen System den physikalischen Größen Wasservolumen  $V$ , Druckdifferenz  $\Delta p$  und Wasserstromstärke  $I_H$  im hydraulischen System.

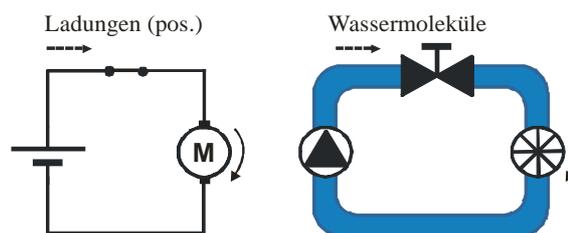


Abb.1: Einfacher elektrischer Stromkreis und Wasserkreisanalgie.

Die Ambivalenz der Wasserkreisanalgie als Lernhilfe wird bereits in [2] hervorgehoben. Die Vertrautheit mit Wasser liegt einerseits auf der Hand, ein Wissen über Wasserstromkreise herrscht andererseits i. A. nicht vor.

Weiterführende systemtheoretische Betrachtungen liefern ferner analoge Differentialgleichungen, die das Strömungsverhalten bei elektrischen und mechanischen Systemen formal ähnlich beschreiben.

Ohmscher Widerstand, Kondensator und Spule sind die drei grundlegenden Elemente im System „elektrischer Stromkreis“. Das Verhalten eines bestimmten elektrischen Systems resultiert aus dem Zusammenwirken der das System konstituierenden Elemente. Die analytische Systembeschreibung erhält man somit aus Element- und Bilanzgleichungen [3]. Letztere sind für elektrische Systeme die beiden Kirchhoffschen Gesetze, also Knoten- und Maschenregel.

Den drei elementaren Baugliedern Widerstand, Kondensator und Spule stehen lediglich Rohrleitung und Behälter gegenüber. Ein analoges Element zur Spule, welche Energie im magnetischen Feld speichert, fehlt.

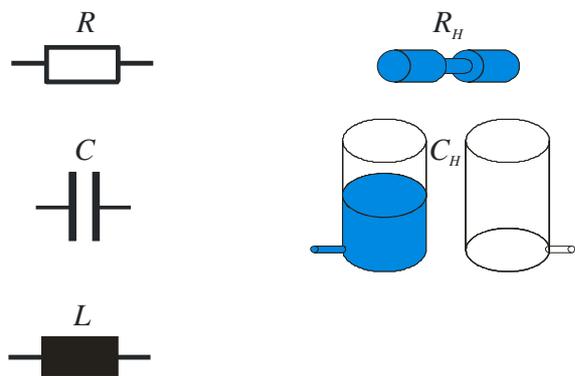


Abb.2: Grundlegende elektrische Bauglieder und analoge Elemente im hydraulischen System.

Die Elementgleichungen für die Bauglieder Widerstand, Kondensator und Spule lauten mit der elektrischen Spannung  $U = \Delta\phi$ :

$$I = \frac{1}{R} \cdot U \quad \{1\}$$

$$I = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad \{2\}$$

$$I = \frac{1}{L} \int U dt \quad \{3\}$$

Hierbei sind R der Widerstandswert eines Ohmschen Widerstandes, C die Kapazität des Kondensators und L die Induktivität der Spule.

Die analogen Elemente Rohrleitung (Verengung bzw. Drossel) und Behälter (Speicher) werden mit dem Differenzdruck  $p_d = \Delta p$  folgendermaßen beschrieben:

$$I_H = \frac{1}{R_H} \cdot p_d \quad \{4\}$$

$$I_H = C_H \cdot \frac{dp_d}{dt} \quad \{5\}$$

Hierbei entsprechen die elektrischen Größen Widerstand R und Kapazität C den hydraulischen Größen Wasserwiderstand  $R_H$  und Fassungsvermögen  $C_H$ .

Das zur Elementgleichung für die Spule {3} analoge physikalische Gesetz, wofür es im hydraulischen Fall kein Element gibt, lautet mit der Trägheit  $L_H$ :

$$I_H = \frac{1}{L_H} \int p_d dt \quad \{6\}$$

Wie zuvor erwähnt wird die Funktionsweise der Batterie im Wasserkreis durch eine Pumpe übernommen. Das analoge Element zur Gleichspannungsquelle ist die in [4] beschriebene Doppelwassersäule, bei der beide Wassersäulen wie in Abb. 3 dargestellt intern über eine Pumpe mit Rückschlagventil verbunden sind.

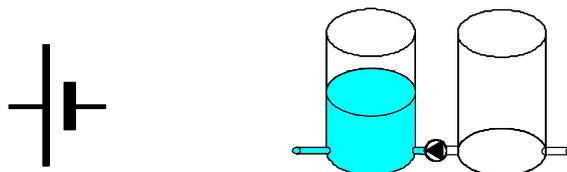


Abb.3: Konstantspannungsquelle und Analogie im Wasserkreismodell.

So wie die Konstantspannungsquelle an ihren Klemmen permanent Ladungen bereitstellt – an der einen Elektrode herrscht Überschuss an Ladungsträgern, an der anderen Ladungsträgermangel – liefert die Doppelwassersäule mit Pumpe permanent Wassermoleküle nach – an der einen Wassersäule herrscht Überschuss an Wassermolekülen, an der anderen fehlen diese.

Dem Element Schalter im elektrischen Kreis entspricht nach Abb. 4 das Ventil im hydraulischen System. Ein kleiner "Schönheitsfehler" ist hier die Diskrepanz bei den Formulierungen "Strom fließt bei geschlossenem Schalter" bzw. "Wasser strömt bei geöffnetem Ventil".



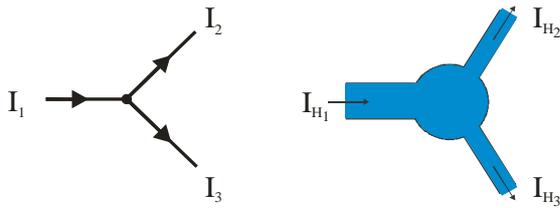
Abb.4: Elektrischer Schalter und Ventil.

Abgesehen von dem fehlenden zur Spule analogen Element können elektrische und hydraulische Systeme durch die dargestellten analogen Größen bzw. Gleichungen relativ ähnlich beschrieben werden.

Die in Abb. 5 für einen Knoten mit N Abzweigungen dargestellte und für das Strömungsverhalten im elektrischen Kreis u. a. maßgebliche Kirchhoffsche Knotenregel kann praktisch eins zu eins für den entsprechenden Fall im hydraulischen System übernommen werden:

$$\sum_{v=1}^N I_v = 0 \quad \text{bzw.} \quad \sum_{v=1}^N I_{H_v} = 0 \quad \{7\}$$

Die Knotenregel besagt, dass die Summe aller auf einen Knoten zufließenden Ströme gleich der Summe aller vom Knoten abfließenden Ströme ist.



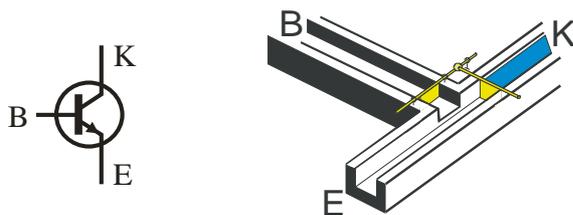
**Abb.5:** Illustration der Kirchhoffschen Knotenregel im Wasserkreismodell.

Die Kirchhoffsche Maschengleichung findet ebenfalls ihre Entsprechung im Wassermodell [4]:

$$\sum_{v=1}^N \Delta\varphi_v = 0 \quad \text{bzw.} \quad \sum_{v=1}^N \Delta p_v = 0 \quad \{8\}$$

So wie im elektrischen Kreis die Summe aller Potentialdifferenzen  $\Delta\varphi_v$  (bzw. elektrischen Spannungen  $U_v$ ) über den Elementen in einer geschlossenen Masche Null ist verhalten sich auch die Druckdifferenzen  $\Delta p_v$  im hydraulischen System.

Auch eine Erklärung der Funktionsweisen elektronischer Bauelemente wie z. B. Dioden oder dem in Abb. 6 dargestellten Bipolartransistor kann im Prinzip mit hydraulischen Systemen (nach dem Schleusenmodell von E. Nehmann) erfolgen [5].



**Abb.6:** Bipolartransistor (npn) und Analogie im Wassermodell (Schleusenmodell nach E. Nehmann).

Zur Erfindung des Bipolartransistors (Bell Labs; Nobelpreisträger Brattain, Shockley und Bardeen) hieß es "it could amplify and switch". Neben dem einfachen Schaltverhalten erkennt man im Wassermodell auch, dass eine kleine Änderung des Basisstromes zu einer merklichen Änderung des Kollektorstromes führt (Verstärkung).

## 2. Grenzen der Analogiebetrachtung

Bei der Wasserkreis analogie bleiben wesentliche Punkte unberücksichtigt, u. a. die Tatsache, dass es zwei Ladungssorten gibt, nämlich positive und negative Ladungen.

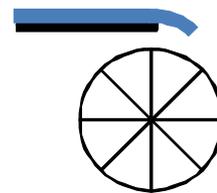
Die Analogie Kondensator-Wasserbehälter ist zumindest hinsichtlich der Kräfte zwischen den Platten fragwürdig, da elektrische Felder im Modell nicht berücksichtigt werden. Ein analoges Element zur Spule, welche Energie im magnetischen Feld speichert, fehlt: Mit bewegten Ladungen verbundene magnetische Felder bleiben ebenfalls unberücksichtigt. Das gesamte Feldkonzept, die durch ruhende Ladungen hervorgerufenen elektrischen Felder und

die durch bewegte Ladungen hervorgerufenen magnetischen Felder, ist in der Analogiebetrachtung somit nicht enthalten.

Als Konsequenz sind wesentliche Effekte nicht beschreibbar. Die grundlegende Kraftwirkung, die aus der elektrostatischen Anziehung bzw. Abstoßung zwischen ungleichnamigen bzw. gleichnamigen Ladungen resultieren, ist in dem Analogiemodell nicht enthalten, somit auch weder Influenz- noch Polarisationserscheinungen. Der gesamte Elektromagnetismus und die elektromagnetische Induktion, worauf die Funktionsweise des in Abb. 1 dargestellten Motors beruht, bleiben außen vor.

Somit sind bei einem Zugang, wo elektrische und magnetische Kräfte bzw. Felder nicht enthalten sind, Fehlinterpretationen möglich. Auf die "negativen Analogien" [1] sollte dann wenigstens hingewiesen werden, eventuell können diese auch thematisiert werden:

Den Rotor eines Elektromotors z. B. treibt der elektrische Strom nicht wie strömendes Wasser ein Laufrad an, sondern über sein Feld.



**Abb.7:** Fehlinterpretationen zur Funktionsweise eines Elektromotors möglich durch Analogiebetrachtung im Wasserkreismodell.

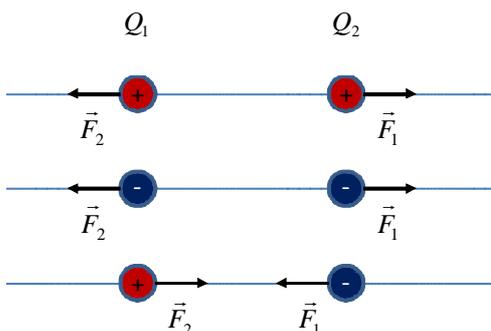
## 3. Multimediale "Bottom up"-Strategie

Im Hinblick auf das technisch-physikalische Verständnis und die Nachhaltigkeit bei der Vermittlung des Lehrstoffes wird ein "Bottom up"-Konzept betrachtet, bei dem der Zugang zu den Lerninhalten durch aktuelle Zeitschriftenbeiträge, Computeranimationen, Videos und interaktive Experimente illustrativ ermöglicht bzw. untermauert wird. Selbst kleine technische Comics (siehe [www.physics.org](http://www.physics.org)) eignen sich vortrefflich u. a. zur Aktivierung und Motivation der Lernenden und dienen der Nachhaltigkeit des Gelernten. Neben selbst erstellten multimedialen Lernelementen kann man über Internetdatenbanken eine Vielzahl von Medien abrufen. Vielfältige Möglichkeiten von Multimedia für die Lehre und Links zu einigen Multimediaservern sind in [6] angegeben.

Im ersten Abschnitt wurde im Hinblick auf eine "Top down"-Strategie, bei der die Wasserkreis analogie als "advance organizer" [2] beim Zugang für den einfachen elektrischen Stromkreis dient, auf die Wasserkreis analogie näher eingegangen. Erst nach der Betrachtung dieser Analogie wird hier den Lernenden die Bipolarität der Elektrizität, d. h. positive

und negative Ladungen, vermittelt und auf die elektrostatische Kraftwirkung bzw. das elektrische Feld eingegangen. Spätestens an dieser Stelle sollten bei diesem Konzept die Grenzen der Wasserkreisanalogie verdeutlicht werden.

Die multimediale "Bottom up"-Strategie orientiert sich stark an der Chronologie der Entdeckungen bzw. Entwicklungen in der Elektrotechnik. Der Einstieg in den Lehrstoff erfolgt über die grundlegende elektrostatische Kraftwirkung und die beiden Polaritäten der Elektrizität. Um das Interesse am Thema zu wecken und nebenbei noch etwas über die Schwierigkeiten beim Experimentieren auch im geschichtlichen Kontext zu erfahren, eignet sich der Beitrag über "Exploratives Experimentieren - Charles Dufay und die Entdeckung der zwei Elektrizitäten" [7]. Aufgrund der Existenz zweier Ladungssorten kommt es überhaupt, wie in Abb. 8 dargestellt, zur elektrostatischen Anziehung bzw. Abstoßung, was durch eine einfache Powerpoint-Simulation anschaulich vermittelt wird. Die elektrische Ladung besitzt Mengencharakter und tritt als Vielfaches der Elementarladung  $1e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  auf.



**Abb.8:** Ladungssorten und Animation der elektrischen Kraftwirkung (repulsiv bzw. attraktiv).

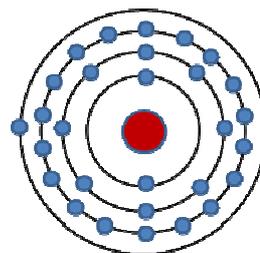
Zur quantitativen Betrachtung wird an dieser Stelle das Coulombsche Gesetz zur Berechnung der Kraft  $F$  zwischen den im Abstand  $r$  zueinander angeordneten Ladungen  $Q_1$  und  $Q_2$  angegeben und durch Computeranimationen illustriert:

$$|\vec{F}| = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad \{9\}$$

An dieser Gleichung sollte man auch nochmals Newtons Reaktionsprinzip verdeutlichen.

In diesem Zusammenhang bietet es sich nun an, positive und negative Elementarladung im Kontext des einfachen Bohrschen Atommodells als die neben den elektrisch ungeladenen Neutronen ( $Q = 0$ ) - konstituierenden Bestandteile (elektrisch) neutraler Atome einzuführen: das Proton ( $Q = +1e$ ) und das Elektron ( $Q = -1e$ ).

Abb. 9 zeigt den Atomaufbau des für die Elektrotechnik wichtigen Metalls Kupfer. Das neutrale Cu-Atom weist genauso viele Protonen wie Elektronen auf.



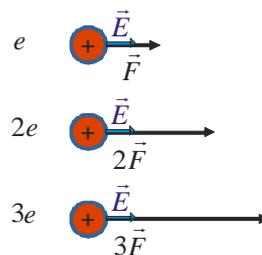
**Abb.9:** Cu-Atom bestehend aus 29 Elektronen in der Atomhülle (blau) und 29 Protonen im Atomkern (rot). Der Atomkern besitzt zusätzlich noch Neutronen. Sehr vereinfachte Animation der Elektronenbewegung um den Atomkern.

Weist ein Teilchen mehr Protonen als Elektronen auf, so ist es positiv geladen – "positives Ion". Überwiegt jedoch die Zahl der Elektronen, so ist es negativ geladen – "negatives Ion". Eine elektrische Aufladung, d. h. Ansammlung von gleichnamigen Ladungsträgern, kann durch Reiben von Isolatoren (Nichtleitern) entstehen: Reibungselektrizität.

Um ein Gefühl für statische Elektrizität zu vermitteln werden nun kleine interaktive Experimente durchgeführt. An den eigenen Haaren geriebene Luftballons bzw. CDs ziehen kleine Papierschnipsel an bzw. lenken einen Wasserstrahl ab.

Die elektrische Feldstärke in einem Aufpunkt, hervorgerufen von einer felderzeugenden Ladung  $Q_0$ , beschreibt die Kraftwirkung an diesem Ort auf eine positive Probeladung  $Q$  unabhängig vom Wert dieser Probeladung (Abb. 10):

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \quad \{10\}$$

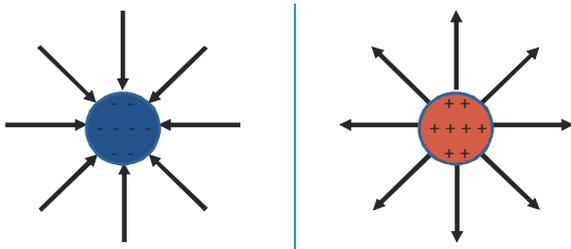


**Abb.10:** Animation von elektrischer Kraft  $F$  und elektrischer Feldstärke  $E$  am Ort einer Probeladung  $Q$  für die unterschiedlichen Werte  $Q = 1e$ ,  $Q = 2e$  und  $Q = 3e$ .

Die Darstellung beliebiger elektrischer Felder erfolgt sehr anschaulich über elektrische Feldlinien, die in jedem Raumpunkt die Richtung der Kraft auf eine positive Probeladung  $Q$  angeben. Insofern beginnen Feldlinien in den positiven felderzeugenden Ladungen und enden in den negativen. Der zugehörige Betrag der Kraft wird durch die Dichte der gezeichneten Feldlinien beschrieben.

Ausgehend von den elementaren Feldlinienbildern einer negativ bzw. positiv geladenen Kugel (Cou-

lombfelder) nach Abb. 11 sollten kompliziertere Ladungsanordnungen behandelt werden, um ein besseres Verständnis für Felder zu bekommen. Die Kraftwirkung auf eine Probeladung  $Q$  entlang der Feldlinien kann durch Computeranimation illustriert werden. Die Anordnung der Ladungen in einem Plattenkondensator liefert schließlich ein homogenes Feld im Bereich zwischen den Platten, d. h. die Feldlinien verlaufen dort parallel und äquidistant.



**Abb.11:** Ruhende Ladung und elektrisches Feld: Animation der Kraftwirkung durch Bewegung einer positiven Probeladung entlang den Feldlinien.

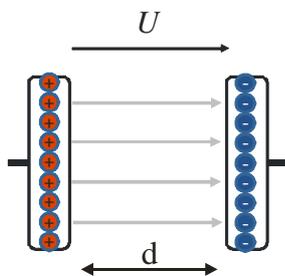
Über die Arbeit im elektrischen Feld wird die elektrische Spannung  $U$  als ladungsbezogene Arbeit eingeführt. Die Arbeit ist bei ortsinvarianter Kraft einfach das Skalarprodukt aus Kraft  $F$  und Weg  $s$  und mit Gleichung {10} gilt:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} = Q \cdot \vec{E} \cdot \vec{s} \quad \{11\}$$

In der Elektrotechnik betrachtet man häufig die vom Feld verrichtete Arbeit [8]: Bei Bewegung der positiven Ladung  $Q$  in Feldrichtung verrichtet das Feld Arbeit, d. h.  $W$  ist positiv. Betrachtet man die von außen an der Ladung verrichtete Arbeit, so ist hier zusätzlich ein Minuszeichen zu berücksichtigen.

Wird nun im homogenen Feld des Plattenkondensators mit Plattenabstand  $d$  eine positive Ladung von der positiv zur negativ geladenen Platte bewegt, so erhält man für die in Abb. 12 angegebene elektrische Spannung zwischen den Platten mit Plattenabstand  $d$ :

$$U = \frac{W}{Q} = E \cdot d \quad \{12\}$$



**Abb.12:** Geladene Elektroden eines Plattenkondensators: Das elektrische Feld im Inneren ist homogen. Animation zur Arbeit im elektrischen Feld durch Bewegung einer Probeladung zwischen den Platten.

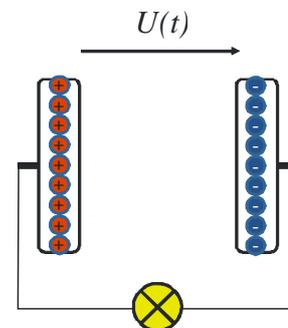
Hier sollte man auf den allgemeinen Fall einer ortsvarianten elektrischen Feldstärke zumindest hinweisen, für den gilt:

$$W = \int \vec{F} \, d\vec{s} = Q \int \vec{E} \, d\vec{s} \quad \{13\}$$

Bei der hier aufwendigeren weiteren Herleitung bedient man sich an Stelle der Auswertung des Linienintegrals einer skalaren Potentialfunktion  $\phi$  und die Spannung  $U$  ist dann die Differenz der Potentiale von Anfangs- und Endpunkt.

Die Kontaktierung der geladenen Kondensatorplatten aus Abb. 12 mit unterschiedlichen Materialien leitet zu Widerstand und Strömungsfeld bzw. elektrischem Strom über.

Nach Abb. 13 werden die beiden entgegengesetzt geladenen Kondensatorplatten nun über ein Lämpchen verbunden. Das transiente Verhalten kann anschaulich sowohl mit einer einfachen Powerpoint-Animation als auch mit einem kleinen Experiment verdeutlicht werden.

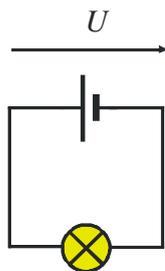


**Abb.13:** Vom elektrischen Feld zum (transienten) Strömungsfeld: Animation/Experiment zum Ladungsausgleich und des dabei vorübergehend aufleuchtenden Lämpchens.

Aufgrund der Kraftwirkung des elektrischen Feldes strömen die beweglichen Elektronen zur positiv geladenen Platte und neutralisieren dort die ortsfesten Atomrümpfe. Es findet also ein Ladungsausgleich statt. Diese Ladungsträgerbewegung bezeichnet man als elektrischen Strom. Nach dem Ausgleichsvorgang haben beide Elektroden gleiches Potential, d. h. die Spannung ist Null.

Es fließt hier kein dauerhafter Strom. Beim Ausgleichsvorgang nimmt die Spannung von  $U$  auf Null ab. Das Leuchten des Lämpchens nimmt ab, es erlischt schließlich. Nach dem Ausgleichsvorgang fließt kein Strom mehr.

Die Konstanzspannungsquelle ist nun ein Bauelement, das an seinen Anschlussklemmen durch dauerhaftes Nachliefern bzw. Bereitstellen von Ladungsträgern eine zeitlich konstante elektrische Spannung liefert. Wird nun an Stelle des Kondensators aus Abb. 13 eine Konstanzspannungsquelle (Batterie) benutzt, so fließt nun ein dauerhafter Strom.



**Abb.14:** Vom elektrischen Feld zum (stationären) Strömungsfeld: Animation/Experiment zum Stromfluss und des dabei dauerhaft leuchtenden Lämpchens.

An dieser Stelle sollte nun die im Vergleich zur Analogiebetrachtung "richtige" physikalische Modellvorstellung des elektrischen Stromes vermittelt werden. Hierbei wird anschaulich das klassische Partikelbild der quasifreien Elektronen herangezogen, das dem Drude-Modell zugrunde liegt. Die Grenzen dieses Modells haben an dieser Stelle keine Bedeutung. Eine exakte Behandlung des Leitungsmechanismus über die Wellenmechanik der Elektronen im Festkörper als die universelle Beschreibung wäre hier fehl am Platz, da die Anschaulichkeit der Elektronengasttheorie und damit verbunden die Nachhaltigkeit des Erlernten verloren ginge. Darüberhinaus existieren beide Modelle teilweise nebeneinander [9]: Gemäß der Interpretation der Fermikugel im Wellenbild tragen lediglich die Elektronenwellen am Rand der Fermikante durch große Impulsänderung zum elektrischen Strom bei. Im Partikelbild sind dagegen alle Valenzelektronen durch kleine Impulsänderung als Ladungsträger am elektrischen Strom beteiligt.

Nach Abb. 9 hat jedes Kupferatom 1 Valenzelektron. Dieses ist schwach gebunden und kann leicht vom Atom losgelöst werden. An den Orten der Cu-Atome, die ihr jeweiliges Valenzelektron als quasifreies Elektron abgeben, bleiben ortsfeste, positiv geladene Atomrümpfe zurück. Ein freies Elektron wird nach einer gewissen Zeit wieder von einem positiven Atomrumpf eingefangen, jedoch gibt dafür ein anderes neutrales Cu-Atom wieder ein Valenzelektron ab. Bei konstanter Temperatur stehen in einem Metall im zeitlichen Mittel etwa  $10^{23}$  quasifreie Elektronen pro Volumen zur Verfügung.

Diese Elektronen können sich quasifrei durch den Kristall bewegen und so zur elektrischen Leitung beitragen („Leitungselektronen“).

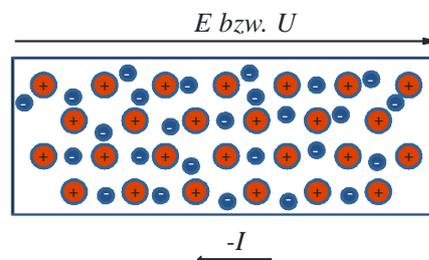
Ohne äußere elektrische Spannung führen die Leitungselektronen regellose Bewegungen aus. Die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen in Kupfer beträgt dabei ca.  $1,6 \cdot 10^6$  m/s und ist somit lediglich etwa 200 mal kleiner als die Lichtgeschwindigkeit! Eine Mittelung über alle Raumrichtungen ergibt natürlich Null.

Liegt nun eine äußere Spannung (d. h. ein elektrisches Feld) an, so überlagert sich dieser regellosen Bewegung eine gerichtete Bewegung der Elektronen

durch Beschleunigung im Feld. Die Elektronen werden dabei entgegengesetzt zur Feldrichtung beschleunigt.

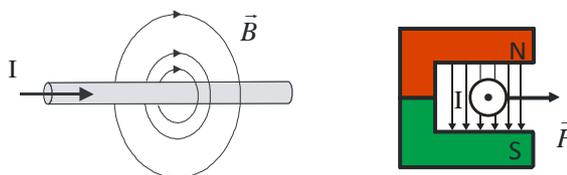
Im Vakuum würden sich nun die Elektronen mit kontinuierlich ansteigender Geschwindigkeit in Gegenfeldrichtung bewegen. Im Metall kommt nun die Wechselwirkung mit dem Gitter hinzu: Durch Zusammenstöße mit Gitteratomen und Fehlstellen werden die Elektronen abgebremst und anschließend wieder bis zu den nächsten Zusammenstößen beschleunigt. Durch abwechselndes Beschleunigen und Abbremsen der Elektronen stellt sich im Metall eine mittlere Geschwindigkeit ein: die Driftgeschwindigkeit der Elektronen. Diese ist in der Größenordnung 2 m/h.

Historisch bedingt betrachtete man jedoch gleichförmig strömende positive Ionen. Der elektrische Strom der Stromstärke  $I$  zeigt gemäß Abb. 15 somit in Feldrichtung, bzw.  $-I$  in Richtung der Elektronenbewegung:



**Abb.15:** Modellvorstellung zum elektrischen Strom.

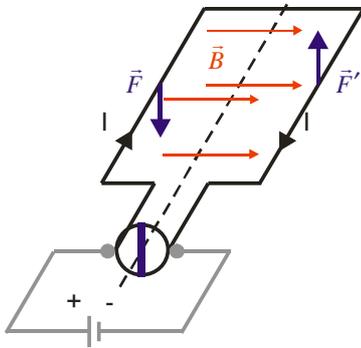
Bewegte elektrische Ladungen wie z. B. in stromdurchflossenen Leitern nach Abb. 16 erzeugen ihrerseits immer ein magnetisches Feld. Mit Eisenfeilspänen kann das radialsymmetrische Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter sichtbar gemacht werden. Umgekehrt wirken auf bewegte Ladungen in einem Magnetfeld Kräfte. Die UVW-Regel (Ursache, Vermittlung, Wirkung) liefert hierbei die Krafrichtung auf positive Ladungsträger. Zahlreiche Computeranimationen oder Videos (siehe z. B. FiPS-Medienserver der TU Kaiserslautern) eignen sich hier zur Illustration.



**Abb.16:** Vom Strömungsfeld zum magnetischen Feld und magnetische Kraftwirkung.

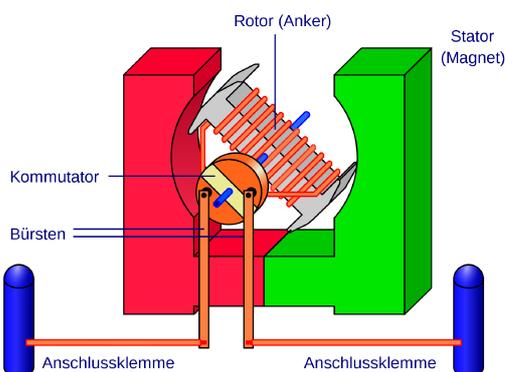
Betrachten wir nun die in Abb. 17 dargestellte stromdurchflossene Leiterschleife im Magnetfeld, so erkennt man direkt mit Hilfe der UVW-Regel, dass das Kräftepaar zu einem Drehmoment führt. Im „Toten Punkt“, wenn die Leiterschleife senkrecht

zur Feldrichtung liegt, ist das Drehmoment  $M = 0$ . Dennoch wird dieser Punkt aufgrund der Bewegungsenergie überwunden. Mit Hilfe eines Kommutators wird die Polarität nun rechtzeitig gewechselt, damit das Kräftepaar immer weiter in Bewegungsrichtung wirkt.



**Abb.17:** Stromdurchflossene Leiterschleife mit Kommutator im Magnetfeld.

Bei der permanenterrregten Gleichstrommaschine in Abb. 18 rotiert im Prinzip ein Elektromagnet im Magnetfeld eines Permanentmagneten. Der Stromfluss durch die Rotorspule führt zum Rotor-Magnetfeld, wobei es zur Kraftwirkung zwischen Stator- und Rotor-Magnetfeld kommt. Der Motor wird über das Magnetfeld des elektrischen Stromes angetrieben. Die Wirkungsweise des Kommutators bzw. Stromwenders wird nochmals deutlich: er sorgt für eine feste Drehrichtung des Rotors. Eine einfache Animation hierzu findet sich auch auf [http://de.wikipedia.org/wiki/Kommutator \(Elektrotechnik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Kommutator_(Elektrotechnik)). Ein Laborexperiment wie z. B. in [10] weckt durch den Praxisbezug zusätzliches Interesse am Lernstoff. Das Verhalten bei Variation der Ankerspannung oder der Betrieb unter Last kann dabei selbst erkundet werden.



**Abb.18:** Der Permanentmagnet-Gleichstrommotor. Quelle: Wikipedia.

Aus Abb. 17 bzw. Abb. 18 wird also ersichtlich, dass der Rotor eines (permanenterrregten) Elektromotors über die Wechselwirkung des (magnetischen) Ankerfeldes mit dem Feld des Hufeisenmagneten angetrieben wird.

#### 4. Zusammenfassung

Im Hinblick auf das technisch-physikalische Verständnis und die Nachhaltigkeit bei der Vermittlung des Lehrstoffes wird ein "Bottom up"-Konzept betrachtet, bei dem der Zugang zu den Lerninhalten durch aktuelle Zeitschriftenbeiträge, Computeranimationen, Videos und interaktive Experimente illustrativ ermöglicht bzw. untermauert wird.

Die mathematische Beschreibung mit Hilfe von Gleichungen sollte zielgerichtet und in verständlicher Weise erfolgen, damit die eigentliche Physik unter dem mathematischen Beiwerk nicht in den Hintergrund gerät. Je nach Zielgruppe ist ein rein qualitatives bzw. phänomenologisches physikalisch-technisches Verständnis auch mit nur wenigen Gleichungen vermittelbar.

Die Analogiebetrachtung im Wasserkreis ist darüber hinaus nicht per se zurückzuweisen. "Der Gebrauch von Analogien ist konstitutiver Bestandteil unserer Welterschließung. [...] Analogien sind darum kein abzuwerfender Ballast in der Entwicklung der Wissenschaften, sondern das unverzichtbare Mittel, unsere Vorstellungen von der Welt zu erweitern und umzugestalten" [1]. Geht es lediglich um die Vermittlung einer Vorstellung zum Strömungsverhalten, so ist die Wasserkreis analogie naheliegend. Soll jedoch aufbauend auf dem Verständnis zum Strömungsverhalten zu Elektromagnetismus, elektromagnetischer Induktion und elektromagnetischen Wellen übergeleitet werden, so ist die multimediale "Bottom up"-Strategie ausgehend von den beiden Ladungssorten und den elektrostatischen Kräften die (chrono-)logischere. Im Rahmen dieser Herangehensweise kann die zusätzliche Betrachtung über die Wasserkreis analogie der Anschaulichkeit ebenso dienlich sein. Es sind bzw. werden hier jedoch die Grundlagen vermittelt, die Fehlinterpretationen zum elektrischen Strom vermeiden sollten. Und letztendlich geht es ja darum, die "richtige" Vorstellung vom elektrischen Strom erfolgreich zu vermitteln.

#### 5. Literatur

- [1] Poser, Hans: Vom Denken in Analogien. In: Berichte zur Wissenschaftsgeschichte, 12 (1989), S. 145-158
- [2] Kirchner, Ernst; Girwidz, Raimund; Häußler, Peter: Physikdidaktik – Theorie und Praxis, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- [3] Merz, Ludwig; Jaschek, Hilmar: Grundkurs der Regelungstechnik – Einführung in die praktischen und theoretischen Methoden, Oldenbourg Verlag, München Wien, 1996
- [4] Schwedes, Hannelore; Dudeck, Wolff-Gerhard: Wasserkreis und die Doppelwassersäule, S. 1-7, <http://www.physik.uni-bremen.de/physics.education/schwedes/text/wasser2d.htm>
- [5] Experimente in der Welt der Elektronik, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co. KG, 1. Auflage, Stuttgart, 2007

- [6] Altherr, Stefan; Wagner, Andreas; Eckert, Bodo; Jodl, Hans-Jörg: Multimedia in der Physik – Vielfältige Möglichkeiten für die Lehre. In: Physik Journal, 4 (2005), Nr. 6, S. 53-57
- [7] Steinle, Friedrich: Exploratives Experimentieren – Charles Dufay und die Entdeckung der zwei Elektrizitäten. In: Physik Journal, 3 (2004), Nr. 6, S. 47-52
- [8] Bosse, Georg; Mecklenbräuker, Wolfgang: Grundlagen der Elektrotechnik I: Das elektrostatische Feld und der Gleichstrom, VDI Hochschultaschenbuch, Düsseldorf, 1996
- [9] Arlt, Gottfried: Werkstoffe der Elektrotechnik, Wissenschaftsverlag Mainz, Aachen, 1989
- [10] Fiebich, Rudolf; Rössler, Winfried; Schollmeyer, Georg: Schülerversuche Physik: Elektrik/Elektronik mit dem Bausteinsystem, PHYWE-Schriftenreihe, 2. Auflage, Göttingen