

# Entwicklung eines mechanischen Modells der Elektrizitätslehre

Kronenberger Arthur  
kronenapp@kronenapp.de

## Zusammenfassung

Dieser Artikel beschreibt den Entwicklungsprozess eines didaktischen Modells der Elektrizitätslehre, das vorwiegend mechanische Analogien verwendet. Es werden einige Fehlversuche und Prototypen aus dem Entwicklungsprozess beschrieben. Bezüglich der Hauptkomponenten werden jeweils Vor- und Nachteile dieses mechanischen Modells erwähnt.

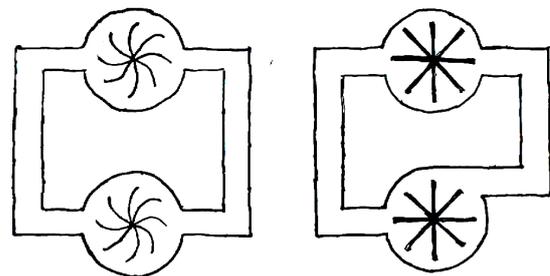
## 1 Mechanisches Modell der Elektrizitätslehre in einer interaktiven Applikation

Seit einigen Jahren arbeite ich in meiner Freizeit an einer interaktiven Applikation, die es dem User ermöglicht, eigene Schaltkreise aufzubauen. So kann der User bei der Erstellung seiner Schaltkreise beispielsweise die Stärke der Widerstände sowie die Anordnung der verschiedenen zur Verfügung stehenden Elemente beeinflussen und eigene Schaltkreise anordnen beziehungsweise aufgebaute Schaltkreise auf deren Funktionsfähigkeit überprüfen. Diese Schaltkreise können in verschiedenen Modellen veranschaulicht und visualisiert werden, was den individuellen Lernprozess des Users unterstützt.

In diesem Artikel gehe ich ausschließlich auf das implementierte mechanische Modell der eingebauten Darstellungsformate ein. Auszugsweise möchte ich hier einige der Probleme und Gedankengänge, die in der Entwicklungsphase aufgetreten sind, schildern. Der Ersteindruck der entwickelten „Module“ soll möglichst viele Fragen bereits vor deren Entstehung durch Analogiebildung beantworten.

## 2 Entwicklungsidee

Die Entwicklung dieses Programms begann mit den Überlegungen zu einem mechanisch vereinfacht dargestellten Wasserkreislaufmodell. Der Grund für diese Gedankengänge war, dass ich damals viele Zeichnungen von Wasserkreislaufmodellen nicht nachvollziehen konnte.

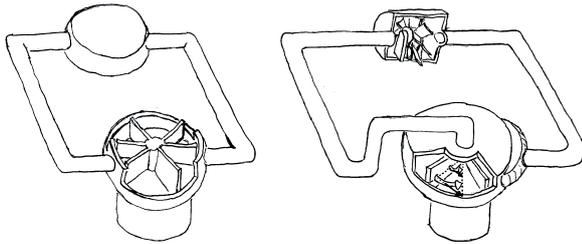


**Abb. 1**

Einige symbolische Nachbildungen von Wasserkreisläufen. Zeichnungen, die ich aus verschiedenen Modellen in Erinnerung habe, wurden hier vereinfacht kombiniert dargestellt.

Die Leitfragen ebendieser Überlegungen waren folgende:

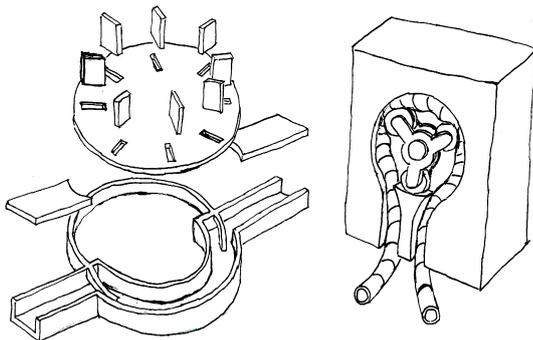
- „Wie kann der Pumpmechanismus funktionieren, wenn aufgrund der Symmetrie in beiden Leitungszugängen gleich viel Wasser hineinfließt?“
- „Was soll der Unterschied zwischen der Batterie und der Glühlampe sein?“
- „Hier ist nun die Symmetrie gebrochen, weil eines der Zufussrohr am Rand montiert ist. Vermutlich hat das etwas mit Reibungskräften zu tun. Aber weshalb sollte sich Wasser hier in eine bestimmte Richtung bewegen, nur weil sich zentral ein Rädchen dreht?“
- „Vermutlich kann sich das Wasser bei gewölbten Rädern sich besser im Kreis mit dem Rad mitdrehen. Warum sorgen dann aber Reibungseffekte dafür, dass Wasser die erste Rohrleitung gegenüber der zweiten Rohrleitung als Ausflussrichtung vorzieht?“



**Abb. 2**

Links: Das Bild, das damals in meinem Kopf entstanden ist.  
Rechts: Ein Bild, das mir damals vermutlich eine Hilfe gewesen wäre.

Aus der heutigen Perspektive ist mir ersichtlich, dass derartige Pumpen den Wasserdruck aufgrund der Zentrifugalkraft nach außen hin erhöhen, dennoch sehe ich das als Themengebiet an, das man nicht im selbigen Atemzug mit der Elektrizitätslehre aufmachen muss. Ein Wasserpumpenmodell sollte dieser Problematik Abhilfe schaffen. Beim ersten geistigen Prototypen war mir wichtig, dass der Wasserdurchfluss linear verläuft, ähnlich dem Grundprinzip einer Dialysepumpe.



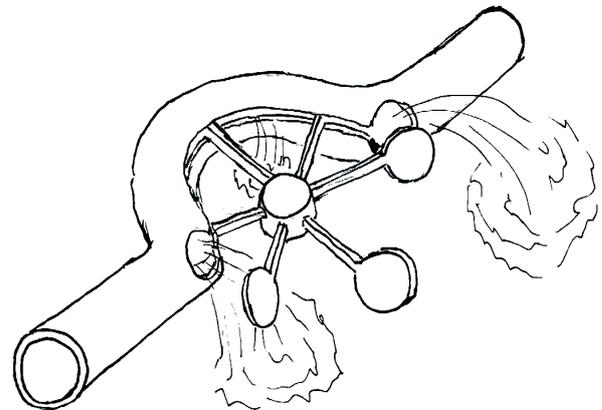
**Abb. 3**

Links: Erster geistiger Prototyp einer Pumpe mit linearem Wasserflussverlauf, bei dem Schiebewände herabgelassen und heraufgezogen werden.  
Rechts: Zeichnung, die einen Pumpmechanismus bei medizinischen Geräten beschreibt. Die Schlauchleitung kann hier leicht ausgetauscht und hygienisch gehalten werden.

Etwaige Zeichnungen führten zu einer für Fachkundige offensichtlichen Vereinfachung des Systems, zeitgleich aber zu einer Verkomplizierung für Neulinge in der Materie. Die Idee eines derartigen Wasserkreislaufmodells wurde zugunsten weiterer Überlegungen bezüglich der auch für Laien gut nachvollziehbaren Verwendung eines derartigen „Zahnrads“ verworfen.

Es entstand ein weiterer, geistiger Prototyp, bei dem die Schiebewände durch bestimmte Löcher in das Rohr hineinfahren und innerhalb des Rohrs das Wasser anschieben. Selbstverständlich blieb dann die Frage offen, wie das Wasser trotz gigantischer Löcher im Rohr, im Rohr verbleiben würde. Auf die

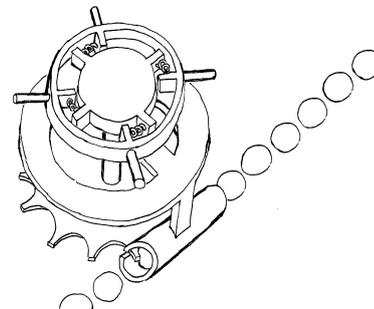
Einführung „magischer Wandbereiche“ wurde verzichtet, um den Fortbestand der Nachvollziehbarkeit fortlaufend zu gewährleisten.



**Abb. 4**

Mit Löchern im Rohr können die Schiebewände, die das Wasser vorandrücken, in das Rohr hineintauchen. Aber: das Wasser kann auch hinaus fließen. Daher sollten hier magische Wandbereiche vorhanden sein, die Schiebearme, aber kein Wasser durchlassen.

Letztendlich wurde das Wasser durch Kugeln veranschaulicht. Dadurch ist der erste Gedankengang dieses mechanischen Modells entstanden.



**Abb. 5**

Ein Rohr, das diesmal Murmeln statt Wasser leitet und einen Schlitz aufweist.

Ausgehend von diesem gedanklichen Beispiel wurde das mechanische Modell immer weiter ausgebaut.

### 3 Verworfenne Prototypen

Nachdem dieser erste Gedankengang mit dem Batteriemodell verfestigt war, wurde darauf aufbauend eine Symbolisierung der **Spannung** entwickelt. Zwei Ideen, die jeweils an einem Prototypen getestet wurden, waren maßgebend:

#### 3.1 Ansatz mit Elektronendichte

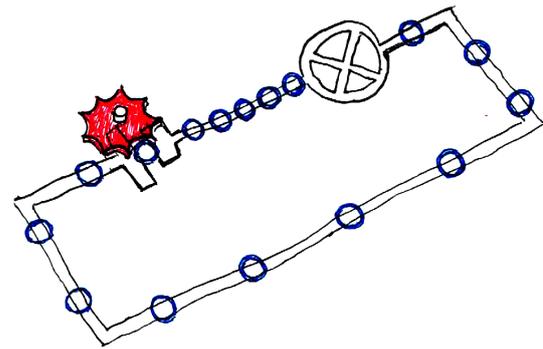
Die erste Idee war, dass der Elektronendruck mit Hilfe des Abstands der Elektronen untereinander dargestellt wird. Das Konzept wurde für einen fest

vorgegebenen Stromkreis programmiert und das Ergebnis sah zunächst gut aus. Nachdem Elektronen durch das Batteriezahnrad „geflogen“ sind, waren diese in einem Bereich mit hohem Elektronendruck. Daher wurde der Elektronenabstand markant geringer. Der Elektronenfluss und die Zahnradposition mussten hier natürlich übereinstimmen, damit der Eindruck erweckt würde, das Zahnrad drücke das Elektron in den bereits überfüllten Bereich. Verzweigungen oder Punkte können einen Offsetsprung verursachen, falls man versucht, ein Elektron den gesamten Weg über mit dem Auge zu verfolgen. Diese Problematik soll im Folgenden jedoch vernachlässigt werden.

Trotz des anfänglich positiven Eindrucks, zeigten sich nach Kurzen neuen Problemfelder: Die Flussgeschwindigkeit der einzelnen Elektronen war zunächst überall gleich hoch. Der Code musste für die Beispiele so angepasst werden, dass die Flussgeschwindigkeit der einzelnen Elektronen in Bereichen mit hohem Potential und folglich geringerem Elektronenabstand wieder relativ gesehen geringer ist. Dieses Problem konnte also „formal“ behoben werden. Obwohl die unterschiedlichen Elektronenflussgeschwindigkeiten als Modellaspekt betrachtet werden können, eröffnet dies meines Erachtens ein hohes Potential für Fehlkonzepte. Die Spannung könnte hier besonders einfach auf eine unpassende Weise mit der Elektronenflussgeschwindigkeit bzw. Stromstärke verknüpft werden.

Bei einem einfachen Aufbau wirkt das Beispiel schlüssig. Das Problem besteht jetzt, wenn sprunghaft oder sogar langsam kontinuierlich die Spannung der Batterie geändert wird. Mit langsam ansteigender Spannung wirkte es in diesem Beispiel so, als ob von einem bestimmten Punkt aus plötzlich viel mehr Elektronen in das Modell hineingedrückt würden. Die Gesamtanzahl der Elektronen nimmt auffällig zu. Die Zunahme ist so signifikant, dass meiner Einschätzung nach berechtigt viele Fehlvorstellungen entstehen können. Erwähnenswert hierbei ist, dass der Punkt, aus dem plötzlich viel mehr Elektronen erscheinen, während der kontinuierlichen Spannungszunahmeprozedur der Batterie, willkürlich ist. Mit anderen Worten: Der damalige Code hat quasi „zufällig“ einen „Startpunkt“ festgelegt aus dem die neuen, zusätzlichen Elektronen bei Spannungszunahme herausgeflossen sind. Im ersten Beispiel war das gerade die Batterie, was den Gesamteindruck gerade hier noch hätte komplizierter machen können, da so der Eindruck entstehen hätte können, dass dann aus der Batterie mehr Elektronen herausfließen würden, wie aus einem Wassereimer.

Das Prinzip mit dem Elektronenabstand in der einspurigen Leitung wurde daher komplett verworfen.

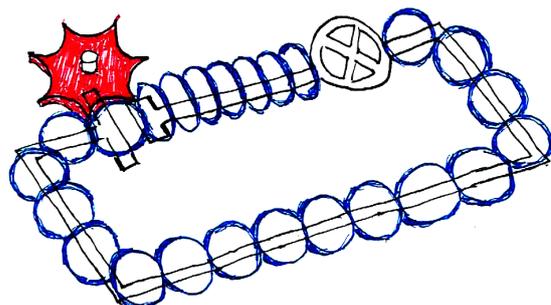


**Abb. 6**

Rekonstruktion eines Prototypen. Das Potential wird mithilfe des Elektronenabstands innerhalb der Leitung dargestellt. Aus dieser nicht-animierten Abbildung sind nicht die unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten ersichtlich. Ebenfalls ist in dieser starren Grafik nicht ersichtlich, dass mit einer kontinuierlichen Potentialerhöhung der Batterien ebenfalls die Gesamtanzahl der Elektronen im Stromkreis kontinuierlich zunimmt.

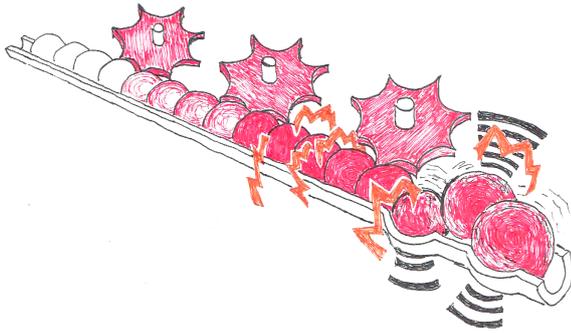
### 3.2 Ansatz mit Elektronenstauchung

Zudem wurden Überlegungen angestellt, wie der Elektronendruck durch eine Stauchung der Kugeln veranschaulicht werden könne. Letztendlich wäre dies indirekt genau das selbige Problem wie vorhin beschrieben gewesen, man müsste nur viel genauer hinsehen. In dieser Variante würde die Problematik der plötzlich ansteigenden Elektronenzahl bei Spannungsunterschieden nicht direkt auffallen, sie wäre aber dennoch vorhanden. Letzten Endes erwies sich die Darstellung des Potentials mit Hilfe des Farbtons als Zuträglichste. Ideen, die noch immer im Raum stehen, sind, dass ab einer gewissen Farbtönsättigung die Kugeln eigene Vibrationsbewegungen erhalten könnten oder sogar leuchtende Blitze um diese dargestellt werden.



**Abb. 7**

Verworfenene Idee mit Stauchung

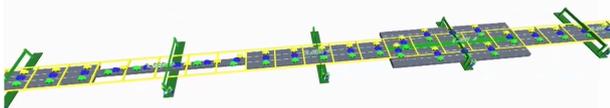


**Abb. 8**

Momentan nicht weiter verfolgte Idee mit steigender Potentialbetonung. Sowohl mit Blitzen als auch Vibration.

### 3.3 Ansatz mit Autobahnmodell

Außerdem stellte sich die Frage, wie man die **Stromstärke** symbolisieren könnte. Obwohl durch das damalige Batteriemodell bereits die Rohrleitung einspurig war, habe ich es gar nicht als selbstverständlich gesehen, dass verbleibende Leiterabschnitte ebenfalls als einspurige Leitungen dargestellt werden müssten. Ich hatte damals noch die Vorstellung, dass es vielleicht sinnvoll sein könnte, manche Leitungsabschnitte breiter, mehrspurig zu machen. Dies wäre eine Analogie zu einem herkömmlichen Fluss, der an manchen Stellen schmaler und an manchen Stellen breiter ist. In diesem Zeitraum hatte ich auch versucht, ein Autobahnmodell umzusetzen, das genau dieses Problem veranschaulichen hätte sollen. Der Gesamt-Durchfluss der Autos ist an jeder Schrankenposition gleich hoch. Die Straße kann aber einspurig, dreispurig oder sogar sechsspurig werden. Die Straße kann asphaltierter Beton sein, auf dem man schnell fahren kann oder ein Feldweg, der nur geringe Geschwindigkeiten zulässt. Je nach Beschaffenheit der unterschiedlichen Faktoren würde sich die jeweilige Fahrtgeschwindigkeit der Autos und der Abstand der Autos untereinander ändern. Der Gesamtdurchfluss an den jeweiligen Schranken wäre aber jeweils gleich gewesen.



**Abb. 9**

Prototyp eines Autobahnmodells.

Obwohl dieses Modell langfristig nicht weiter verfolgt wurde, hat es eingängige Eindrücke hinterlassen, die gegen die Verwendung mehrspuriger Rohrleitungen sprachen. Falls man mehrspurige Leitungen zur Auswahl gehabt hätte, hätte man vermutlich schöne Analogien zu unterschiedlichen Kabeltypen mit den jeweiligen Widerstandswerten machen können. Der Zwang die Leitungen einspurig zu halten, hat aber

folgenden großen Vorteil: Wenn der User unfähig sein sollte, die zeitliche Komponente der Stromstärke zu berücksichtigen, könnte er sich fälschlicherweise einprägen, dass eine geringere Flussgeschwindigkeit automatisch eine geringere Stromstärke zur Folge hätte. Dass diese Geschwindigkeitsabnahme in diesem Beispiel ausschließlich durch eine Verbreiterung der Leitung initiiert wurde, könnte hier leichter fehlinterpretiert werden. Falls also irrtümlicherweise nur die Geschwindigkeit der Elektronen bzw. Kugeln in diesem Modell betrachtet werden sollten, hat der User möglicherweise noch immer ein falsches Konzept eingepreßt. Falls die Leitungen nun aber auf eine Spur begrenzt werden, kann dieses bereits falsche Konzept keine zusätzlichen Verschlimmerungen erhalten. Obwohl der User eine falsche Auffassung im Modell gewinnen könnte, bleibt diese noch immer konform mit der Betrachtung der Linearität zwischen Bewegungsgeschwindigkeit der Kugeln und der Stromstärke. Solange der User nicht auf die Idee kommt, die Rohrleitung, bzw. das reale Kabel könnte plötzlich dicker werden, kann die Merkhilfe gerettet werden. Vermutlich würde die Anzahl der User, die selbstständig auf die Idee kommen würde, die Leitungen aus Spaß breiter bauen zu wollen, gleichzeitig das ursprüngliche Problem korrekt verstehen. Es gibt also meiner Ansicht nach keinen signifikanten Mehrwert, der es rechtfertigt, dieses Fehlerpotential zu verantworten.

## 4 Einige Beispiele aus der Entwicklung

### 4.1 Batterien

Im Hinblick auf die Batterie werden ebenfalls zwei Varianten in diesem Modell angeboten, welche jeweils durch zahlreiche Iterationsschritte entstanden sind.

Bezüglich der Zahnradbatterie sind folgende Punkte besonders erwähnenswert: Zunächst haben vier „Voltzwerge“ an vier Stäben mit jeweils vier Sprungfedern das Zahnrad angeschoben. Dann wurden die Bestandteile der mechanischen Apparatur farbig differenziert, damit man leichter erkennt, dass nur das äußere Drehrad angeschoben wird und nicht automatisch die Drehachse. In einem weiteren Schritt wurden die vier Sprungfedern zu einer kombiniert. Dafür musste die Symmetrie des äußeren Rings gebrochen werden, um Diskussionen zu vermeiden, die sich damit beschäftigten, weshalb die anliegende Kraft bzw. Spannung nicht mit der Zahl 4 multipliziert werden müsse. Ebenfalls wurde es dadurch möglich, den Stauchungsbereich der Feder viel länger zu gestalten und die Sichtbarkeit einer Stauchungsskala zu verbessern. Zunächst waren vier „Voltzwerge“ eingeplant. Aus Performancegründen wurde die Anzahl reduziert, damit die Applikation auch auf einem Toaster laufen kann. Dabei ist aufgefallen,

dass bezüglich der „Voltzweig“-Anzahl selbiges Problem auftreten könnte, wie mit der Anzahl der vier Sprungfedern, also hat sich der zu reduzierende Bereich ergänzt. Dennoch sollte aus optischen Gründen die Symmetrie mit den Stäben konstant gehalten werden.

Bezüglich der „Spritzenbatterie“ sind folgende Punkte besonders erwähnenswert. Die Höhe der Spritze symbolisiert die Energiespeicherkapazität, die zunächst variabel war. Diese Option wurde zunächst wieder entfernt. Die Buttons, die den Spannungswert verändern, waren ursprünglich mit [+] und [-] beschrieben. Die dadurch entstandene Problematik ist, dass der [-] Anschluss der Batterie räumlich nahe am [+] Schalter lag und vice versa der [+] Anschluss nahe am [-] Schalter. Auf den ersten Blick könnte also ein Laie davon ausgehen, dass der rechts abgebildete Anschluss der [+] Anschluss wäre. Kurzzeitig habe ich überlegt, ob ich den gesamten Aufbau oder die Schaltreposition spiegeln sollte. Da aber der Lesefluss von links nach rechts beibehalten werden sollte, wurde eine derartige Änderung nicht vorgenommen, da sich so nur die Problematik potentieller Fehlinterpretationen verschoben hätte. Schließlich wurde das Problem gelöst, indem die Schalter mit einer Symbolik versehen wurden, wie sie von einem Volumendrehrad einer Musikanlage geläufig ist.

Ebenfalls stand die Überlegung, den Hohlraum oberhalb des Kolbens mit Kugeln aufzufüllen im Raum. Die Tatsache, dass dadurch der geschlossene Kreislauf besser visualisiert werden kann, war letztlich ausschlaggebend.

## 4.2 Widerstände

Eine Herausforderung war die Darstellung des **Widerstandes**, die ebenfalls mit einer langwierigen Genese und dem sorgfältigem Abwägen etwaiger Vor- und Nachteile verbunden war. Letztendlich gibt es nun drei Varianten, um es dem User im Falle von Unverständnis zu ermöglichen zur nächsten Erklärvariante zu wechseln.

## 4.3 Leitungswiderstand

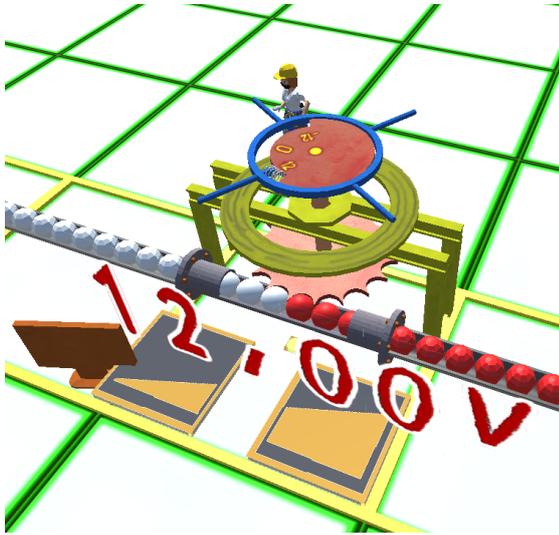
Um maximale Verständlichkeit zu gewährleisten, sollten für Laien herkömmliche Leitungen widerstandsfrei sein. Bei diesen Animationen könnte allerdings berechtigt die Frage aufkommen, weshalb auf der Batterie steht, dass eine 6,00V Spannung anliegt, das Voltmeter nahe der Glühlampe aber ein 5,8V Spannungsgefälle anzeigt. Um andere, schlimmere Probleme zu vermeiden wurde beschlossen, dass jedes Leitungsstück, also jede Spielkarte, zumindest symbolisch einen kleinen Widerstandswert zugeschrieben benötigt.

Das Allererste, das manche User mit solchen Applikationen machen, ist zu prüfen, was passiert, wenn

man einen Kurzschluss legt. Allein die Tatsache, dass jedes Leitungsstück einen, wenn auch geringen, Widerstand besitzt, sorgt dafür, dass die Visualisierung korrekt bleibt. Je geringer diese Widerstandswerte sind, desto größer könnten die Rundungsfehler im Algorithmus sein, desto grober könnten dann wiederum ggf. Steigungsverhalten beim Wasserfallmodell oder die noch abruptere Abnahme im jeweiligen Farbton stattfinden. Aber insgesamt erscheint die Darstellung noch immer schlüssig. Technisch betrachtet habe ich überlegt, einen künstlichen Höchstgeschwindigkeitspuffer für den Elektronenfluss oder Wasserfluss einzubauen, da zahlreiche Darstellungsfehler in der Flussgeschwindigkeit aufgrund der relativ geringen Framerate aufgetreten sind. Falls die Elektronenflussgeschwindigkeit ganz hoch ist, ganz bestimmte Werte angenommen werden sowie eine sehr ungünstige, geringe Framerate vorliegt, kann es nicht nur vorkommen, dass die Kugeln abrupte Sprünge aufweisen, sondern auch, dass die Darstellung auf dem Monitor die Kugeln in die falsche Richtung laufen lässt. Das ist eine Problematik, die hier am Rande erwähnt werden soll. Jedenfalls hätte die Option von widerstandsfreien Leitern zusätzliche gravierende Fehler im Algorithmus verursachen können.

## 5 Einige Bauelemente des mechanischen Modells

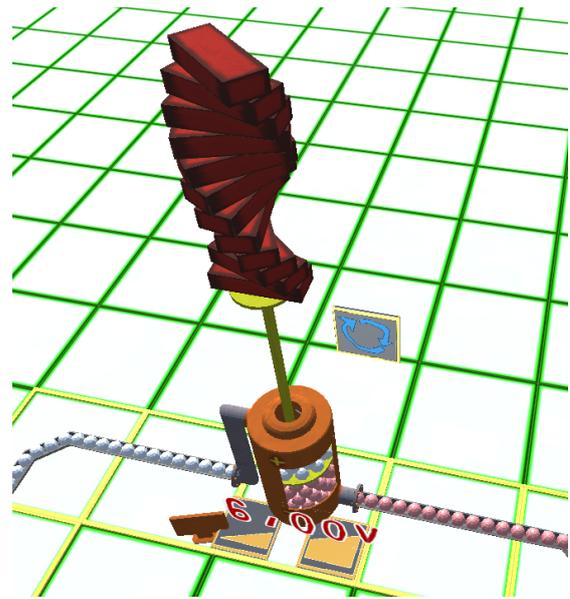
Batterie Version 1



Das Besondere an diesem Ansatz ist, dass die „Zwerge“ immer einen bestimmten Druck auf die Sprungfeder ausüben. Der Druck der Sprungfeder symbolisiert die anliegende Spannung. Die „Zwerge“ selbst haben keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit, die sie aufrecht erhalten müssen, damit dieser Druck konstant bleibt. Mit anderen Worten: Ich sage dem Zwerg, wie stark die Sprungfeder gestaucht werden soll. Folglich sage ich dem Zwerg, wie viel Druck dieser auf das Zahnrad ausüben soll. Weil aber die gesamte Leitung beeinflusst, wie stark das Zahnrad nachgibt, kann es sein, dass in manchen Batterien die Zwerge schneller laufen müssen, als in anderen Batterien, um die selbige Federspannung aufrecht zu erhalten.

- Hier wird die Druckzunahme besonders anschaulich dargestellt.
- Diese Darstellung ist besonders geeignet für Wechselspannung. Der „Zwerg“ drückt dann abwechselnd die blaue Stange nach vorne und zieht die blaue Stange auch zu sich.
- Ein Grundverständnis über Erdung wird bei dieser Veranschaulichung der Wechselspannung vorausgesetzt.
- Die „Entleerung“ einer Batterie kann hiermit nicht visualisiert werden.

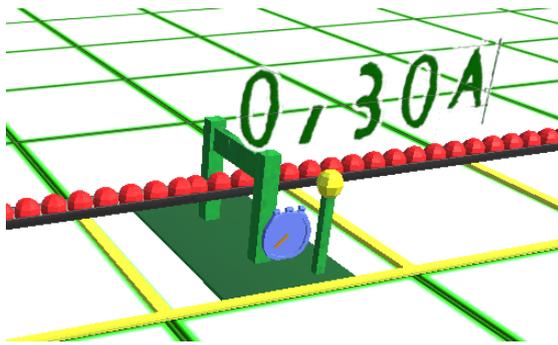
Batterie Version 2



Das Besondere an diesem Ansatz ist, dass die gespeicherte Energiemenge einer Batterie veranschaulicht werden kann. Hier wird das Prinzip einer Spritze aufgegriffen. Um den Druck auf den Spritzenkolben zu symbolisieren, wurde beabsichtigt auf Sprungfedern oder ein Handsymbol verzichtet. Die Anzahl der vorhandenen Ziegelsteine auf dem Spritzkolben symbolisiert den Druck unterhalb des Kolbens. Dies veranschaulicht, dass der vorhandene Druck (Potentialdifferenz) nicht zwangsweise die Durchflussgeschwindigkeit der Kugeln beeinflusst.

- Kompatibel mit der Reihenschaltung und der Parallelschaltung. Vergleichbar mit der Hydraulik einer Hebebühne.
- Der Farbton symbolisiert den Druck und wird hier unverzüglich aktualisiert. Der Kolben symbolisiert hier eine Trennwand und die Potentialdifferenz. Dies betont den Druckunterschied und visualisiert besonders die Reihenschaltung von Batterien.
- Die Höhe der Batterie symbolisiert die gespeicherte Energiemenge. (ggf. in dieser Applikationsversion nicht einstellbar)
- Der Aufbau symbolisiert die „Entleerung“ einer Batterie. Trotz der „Entleerung“ ist diese weiterhin mit Elektronen gefüllt.
- Für den direkten Vergleich mit einer Spritze müsste der Bereich oberhalb des Druckkolbens frei sein.

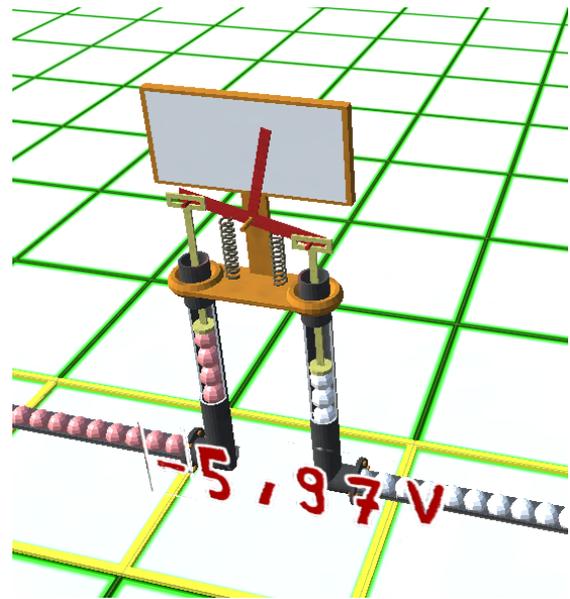
### Amperemeter



Das Amperemeter wird durch ein Tor dargestellt. Die Anzahl der Kugeln, die innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls durchfließen, symbolisiert die Stromstärke. Nachdem eine bestimmte Anzahl an Kugeln durch das Tor geflossen ist, leuchtet die nebenstehende Lampe kurz auf. Damit die Stromstärke nicht mit der alleinstehenden Anzahl an durchfließenden Kugeln ohne zeitigen Bezug verwechselt wird, wird zusätzlich nebenan stehend eine Stoppuhr abgebildet. Es wurde beabsichtigt ein Tor gewählt, damit es langfristig eine Merkhilfe für den Zusammenhang mit der Reihenschaltung ist. Das zu betrachtende Kabel muss durch die Messapparatur laufen. Dieser in Reihe verlaufende Tordurchgang soll einen Kontrast zum später aufkommenden Voltmeter darstellen, welches parallel geschaltet werden muss. Eine geistige Hürde im Sprachgebrauch könnte sein, dass die Stromstärke bezüglich eines Punktes und nicht bezüglich eines Leiters angegeben wird. Ein Tor als Punkt zu bezeichnen, kann hier möglicherweise Fehlvorstellungen verursachen, obwohl der Fachjargon so richtig wäre. Beispiele hierfür sind: „Die Stromstärke am Punkt P1 beträgt 4 Ampere.“ oder „Durch das Kabel fließt der Strom.“

- Die Anzahl der durchfließenden Teilchen pro Zeiteinheit symbolisiert die Stromstärke.
- Da die Teilchen durch das Tor hindurch müssen, ist das Prinzip der Reihenschaltung dieses Messinstruments veranschaulicht.
- Die nebenstehende Lampe und die Stoppuhr betonen die Zeitabhängigkeit.
- Der Unterschied der Stromstärke im Gegensatz zur Flussgeschwindigkeit wird hier hervorgehoben, da die Standardleitung hier einspurig ist. Bei zwei parallelen Leitungen wäre die Flussgeschwindigkeit halb so groß, aber die Stromstärke wäre identisch, da die Gesamtanzahl an Kugeln, die pro Zeiteinheit durchfließt, gleich hoch ist.

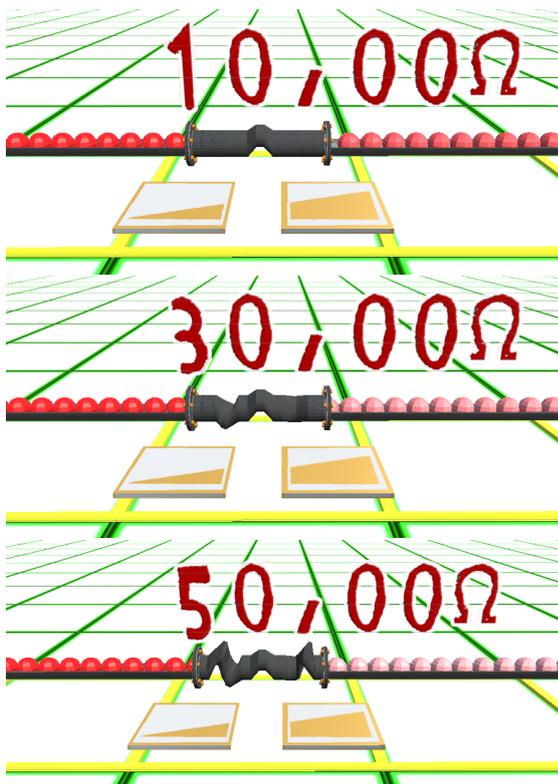
### Voltmeter



Das Voltmeter ist hier explizit so aufgebaut, dass keine Kugeln durch die Apparatur hindurch fließen können. Dadurch wird veranschaulicht, weshalb ein Voltmeter parallel zur gewählten Schaltung angeschlossen werden muss. Durch die Waagenarmdarstellung wird ebenfalls betont, dass ein Voltmeter lediglich Potentialdifferenzen messen kann, aber keine Potentialabsolutwerte. Die Sprungfedern wurden hier symbolisch eingebaut, damit kein Widerspruch bei einer Betrachtung aus einem rein mechanischen Ansatz auftritt. Leistungsstarke Betrachter sollen hier keinen Widerspruch zum Hook'schen Gesetz entdecken können. Falls diese im idealen Modell fehlen würden, reichte eine minimale Potentialdifferenz aus, um den Zeiger theoretisch unendlich weit auszulenken.

- Veranschaulicht, weshalb ein Voltmeter den Druckunterschied und nicht den eigentlichen Druck misst.
- Da nichts durch diesen Aufbau hindurchfließen kann, wird veranschaulicht, weshalb ein Voltmeter parallel angeschlossen werden muss.
- Könnte ggf. aus programmierertechnischer Sicht Fehldarstellungen bzw. Fehlvorstellungen verursachen, falls ein Ende lose ist. Dies könnte aber mit der Impedanz argumentiert werden.

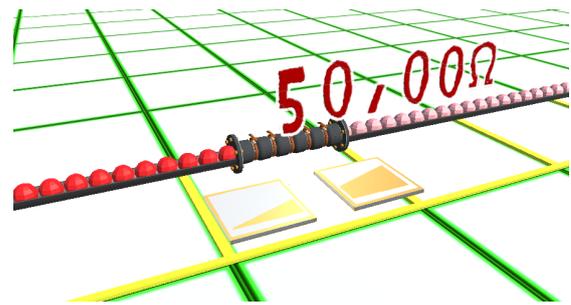
### Widerstand Version 1



Der Widerstand soll hier primär Reibungseffekte ausnutzen und den Abfall an Spannung visualisieren. In dieser ersten Version des Widerstands nimmt die Ausprägung der Verkrümmung des Rohrs vom Komplexitätsgrad mit steigendem Widerstandswert zu. Je höher der Widerstand ist, desto mehr Kurven und Beulen befinden sich im Rohr. Das künstliche Verstauchen verursacht hierbei Reibung. Dieses Modell impliziert, dass die regulären Rohrleitungen fast ideal sind und kaum Reibungseffekte auftreten. Abhängig vom aktuellen Stand der Darstellung wird dies durch mehr Kurven und mehr Dellen dargestellt.

- Stellt den Widerstand durch Reibungseffekte dar.
- Je höher der Widerstandswert ist, desto mehr Kurven und Dellen sind im Rohrschnitt dargestellt.
- Alltagsbezug.
- Impliziert, dass Elektronen zusammengedrückt werden können. Dies kann einen Widerspruch dazu darstellen, dass die regulären Kugeln in den regulären Leitungen nicht zusammengedrückt werden, aber stattdessen lediglich den Farbton ändern.

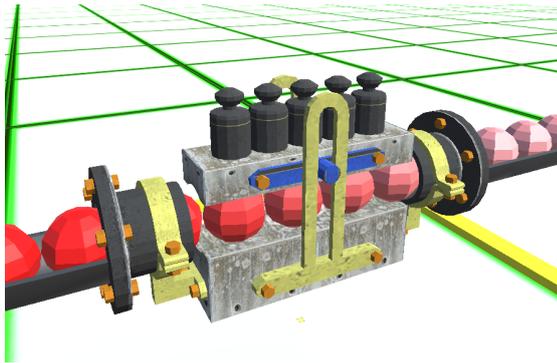
### Widerstand Version 2



In dieser zweiten Version des Widerstands ist das Rohr mit Seilen verengt. Je höher der Widerstandswert ist, desto mehr Bindungen sind um das Rohr gewickelt. Dieses Beispiel geht davon aus, dass Seile Metallrohre zusammenschnüren können. Jedenfalls wurde beabsichtigt darauf geachtet, dass mit steigendem Widerstandswert, die Anzahl der Bindungen steigt und nicht die Enge der vorhandenen Bindung. Dadurch, dass die Betonung auf die Zunahme der Anzahl der Bindungen liegt, wird die Summierung in Reihe betont. In einem weiteren, anderen Ansatz könnte man davon ausgehen, dass mit steigendem Widerstandswert, die vom Seil verursachte Verengung immer enger wird. Aufgrund der Vergleichbarkeit mit der Reihenschaltung von Widerständen wird die erste Version hier eingesetzt.

- Stellt den Widerstand durch Reibungseffekte dar.
- Je höher der Widerstandswert ist, desto mehr Seilbindungen sind vorhanden. Dadurch kann auch die Summation des Widerstandswert einer Reihenschaltung veranschaulicht werden.
- Impliziert, dass Elektronen zusammengedrückt werden können. Dies kann einen Widerspruch dazu darstellen, dass die regulären Kugeln in den regulären Leitungen nicht zusammengedrückt werden, aber stattdessen lediglich den Farbton ändern.

### Widerstand Version 3



In dieser Version werden die Kugeln zwischen zwei Betonsteine hindurchgepresst. Die Reibungseffekte sorgen hier für eine visuell ersichtliche, graduelle Abnahme des Potentials. Das Besondere hierbei, in Relation zu den zwei vorangegangenen Modellen ist, dass hier die Potentialabnahme bzw. die Kugeln selbst während des Durchwanderungsprozesses sichtbar sind.

- Stellt den Widerstand durch Reibungseffekte dar.
- Möglicherweise die naheliegendste Erklärung.
- Visualisiert graduellen Potentialabfall und die Elektronen per se. Die Kugeln selbst werden hier nicht zusammengedrückt, was den Realitätsgrad der Visualisierung bei diesem Ansatz steigert.
- Das Konzept von Oberflächenreibung muss hier gut verständlich sein. Die Auf- und Abbewegung des oberen Ziegelsteins wirkt realistischer, könnte aber auch bei manchen Betrachtern mehr Fragen öffnen, als beantworten. Es wird explizit von einer rauen Betonoberfläche ausgegangen, ohne diese explizit durch weitere Rillen zu visualisieren.

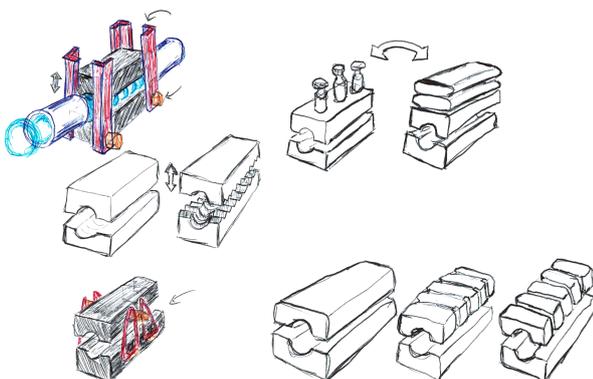
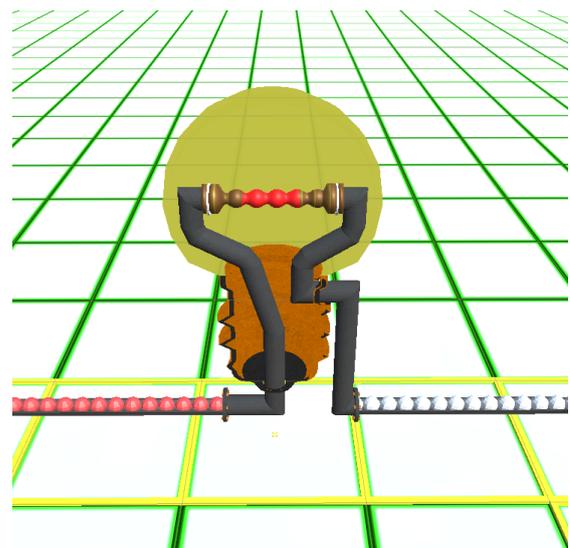


Abb. 10  
Concept Art - Widerstand

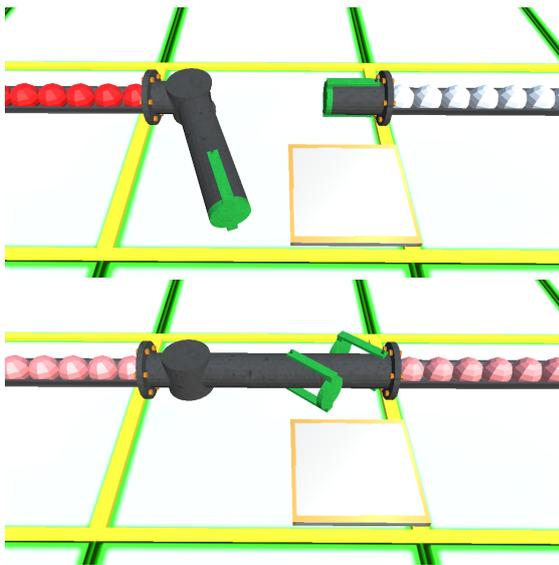
### Glühlampe



Die Glühlampe soll primär als Widerstand dargestellt werden, gleichzeitig aber eine reale Glühlampe darstellen. Die Leitungen sind beabsichtigt so dargestellt, dass ein Eingang unten und ein Ausgang seitlich angebracht ist. Die Leitungen sehen normal aus, bis diese zumindest an die Spitze ankommen. Dort ist die Leitung mithilfe eines Schlauchs sehr dünn dargestellt. Durch diese Verengung wird das Aufglühen symbolisiert. Diese Verengung symbolisiert gleichzeitig die Reibung. Bei der Programmierung wurde besonders darauf geachtet, dass die Schlauchtextur bezüglich der Seitenbewegung konstant am Platz bleibt, die durchfließenden Kugeln aber dennoch durch die sich fortbewegenden Verdickungen dargestellt werden.

- Zwei verschiedene Anschlüsse der realen Glühlampe werden dargestellt.
- Verdünnung des Drahtes wird mit Gummischlauch veranschaulicht.
- Der Gummischlauch symbolisiert die Reibung.
- Je größer die Durchflussrate im dünnen Gummischlauch ist, desto heller wird dieser dort.
- Der Farbton des glühenden Drahtes korreliert in dieser Version unglücklich mit der Farbcodierung der Kugeln.

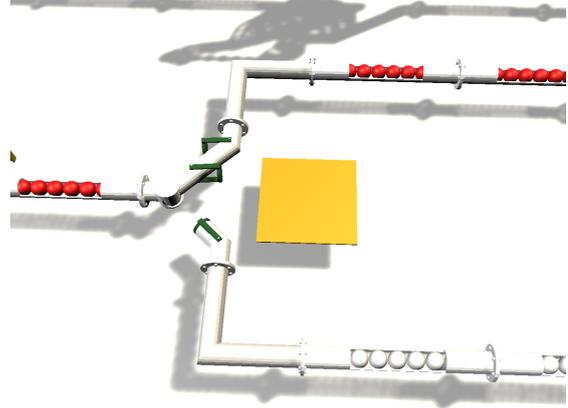
### Schalter (einfach)



Der einfache Schalter sollte in diesem mechanischen Modell nicht einfach nur den Durchfluss unterbinden, sondern gleichzeitig den Abstand der Leitungen symbolisieren, sofern der Schalter offen ist. Daher wurde von einem Ventilsystem, wie bei einem Wasserhahn oder einer Schleuse mit Klappe hier abgesehen. Das neu entstandene Problem bei diesem Ansatz war allerdings, dass bei einem offenen Schalter dennoch Druck innerhalb der Leitungen vorhanden sein konnte und Kugeln dadurch hier einfach herausrollen könnten. Daher wurde die Lösung mit den Endkappen angesetzt, die bei einem offenen Schalter automatisch die Enden schließen. Hier sieht man, dass der Druck der Elektronen aufgrund des Aufbaus keinen Einfluss auf die Deckelposition haben kann. Falls man ganz genau ist, bräuchten die Deckelklappen einen zusätzlichen Sprungfedermechanismus. Dieser wurde zumindest hier nicht aufgrund von Faulheit oder Zeitmangel beabsichtigt weggelassen, sondern, um kognitive Kapazitäten nicht zu überfordern.

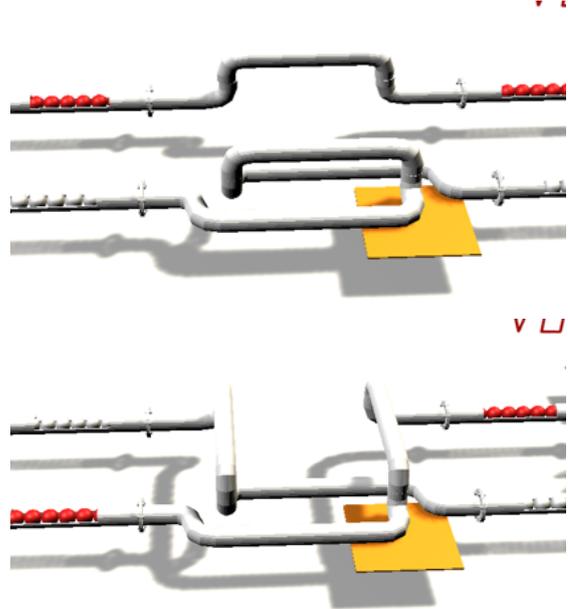
- Es wird veranschaulicht, weshalb Elektronen nicht aus dem Metall herausfließen können und die Kontakte sich beim Schließen des Schalters berühren müssen.
- Unterdruck wird nicht anschaulich visualisiert, da bei so viel Spielraum die Kugeln einfach in die entgegengesetzte Richtung wegrollen könnten.

### Wechselschalter



- Flurschaltungen können veranschaulicht werden.

### Kreuzschalter



- Flurschaltungen können veranschaulicht werden.

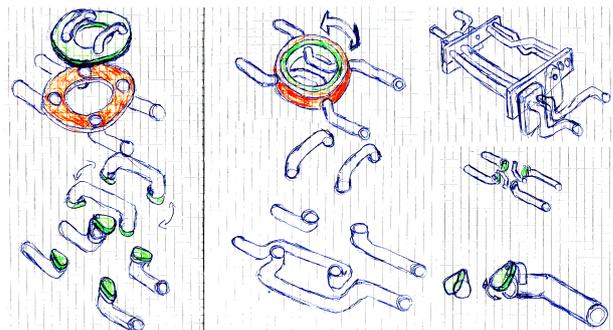
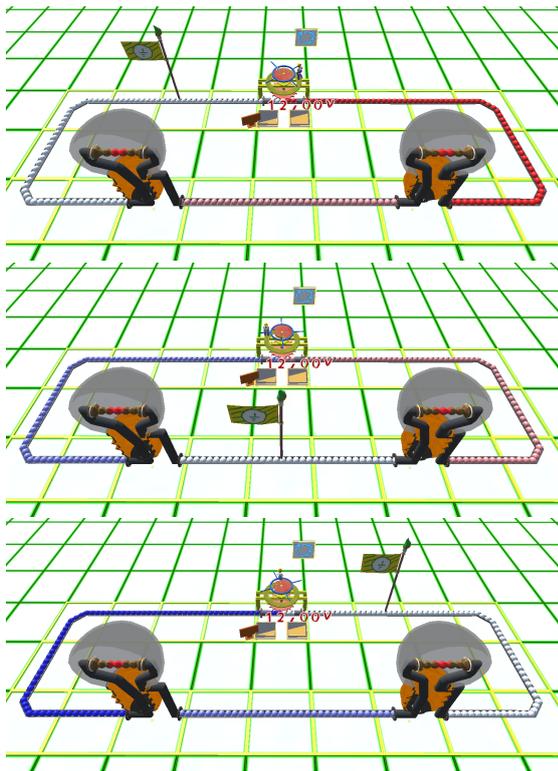


Abb. 11  
Concept Art - Schalter

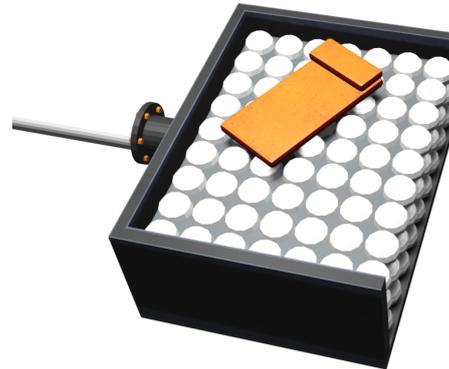
### Erdungsfahne



Man möge in dieser Betrachtung nicht die „Erdungsfahne“ mit der „Erdung“ verwechseln. Die „Erdungsfahne“ ist ein künstliches Konstrukt dieses mechanischen Modells. Der Algorithmus weiß nicht, bei welcher Position dieser das Nullpotential festlegen soll. Intuitiv würden viele vermutlich am Pluspol der einzelnen Batterie das „Null-Level“ festlegen. Sobald aber beispielsweise mehrere Batterien auftauchen, kann die Potentialdarstellung verwirrend wirken. Falls eine echte Erdung vorkommen sollte, ist dieses Konstrukt überflüssig. Mit anderen Worten: In manchen Beispielen wissen wir nicht, ob der „Voltzweig“ die Kugeln von der linken Seite in die Glühlampe hindurchdrückt, oder ob der „Voltzweig“ die Kugeln aus der rechten Seite aus dem Schlauch herauszieht. Die Flussrichtung ist in beiden Fällen identisch. Der User kann eine oder mehrere Erdungsfahnen in beliebige Punkte vom Schaltkreis stecken. Der Algorithmus versucht nun, diese Punkte als „Null-Potential“ zu berücksichtigen. Die Fahnen verschwinden beabsichtigt nach einer gewissen Zeit mit der Absicht, dass der User diese vergisst. Falls nämlich im Algorithmus durch diesen künstlichen Input Konflikte auftreten, werden ältere Erdungsfahnenpositionen ignoriert. In einem Potentialstufenmodell bestimmt dieses Feature den Offset des Bezugssystems.

- Der User kann das Potential-Null-Niveau spontan selbst bestimmen.

### Erdung



Die Erdung wird hier durch den Zugang zu einer sehr großen, offenen „Badewanne“ symbolisiert. Dies ergänzt das Denkmuster von „Überdruck“ und „Unterdruck“. Weil der „Wasserpegel“ der Badewanne aufgrund der Größe der Badewanne konstant bleibt, passt sich von hier ausgehend der Druck im System an. Kugeln dürfen hineinfließen. Kugeln könnten auch herausfließen, aber Druck wird aufgrund der offenen Form nicht mehr aufgebaut. Kugelbewegungen im Zulaufrohr zur Badewanne finden ggf. nur dann statt, falls mehrere Stromkreise über die Erdung „verbunden“ sind, folglich mehrere Badewannen innerhalb einer Szene gebaut wurden.

- Das Prinzip der Erdung wird mit unendlich großen Badewannen veranschaulicht.

## 5.1 Weitere Module

Es existieren bereits mehrere fertige Modelle, Prototypen und Konzepte von weiteren Schaltkreiskomponenten. Darunter zählen beispielsweise: Transistor, Transformator, Diode, Kondensator, Spule. In diesem Artikel musste ich eine Vorauswahl selektieren. Bisher sind die „Standardelemente“ in der aktuellen Version implementiert.

## 6 Das Computerspiel

Die interaktiven Applikation entwickelte sich immer mehr zu einem Jump and Run Computerspiel zum Thema Elektrizität. Im Spielverlauf soll der User die Option haben, sich Wissen aus dem Bereich der Elektrizitätslehre anzueignen. Er muss seine Fachkenntnis letztendlich zum Lösen der vorhandenen Rätsel anwenden.

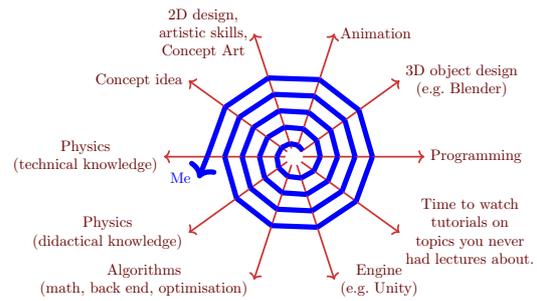
Unter Vorbehalt ist momentan geplant, dass es eine Story-Mode-Version und eine Demolevel-Version geben soll. Die Demolevel-Version wäre in diesem Fall voraussichtlich frei verfügbar. In der Demolevel-Version stehen dann voraussichtlich alle gängigen Bauelemente zur Auswahl, um einen eigenen Schaltkreis zu erbauen, zu testen und zu visualisieren.

Mein Ziel ist es Stromkreise im Spiel mithilfe von verschiedenen Themes darzustellen. In diesem Artikel wurde nur das **Murmelmmodell** vorgestellt. Nebenbei soll es auf Knopfdruck beispielsweise auch das **Wasserschlauch-Modell**, das **Wasserfall-Modell**, **Blockbaustein-Modell**, das **Realitäts-Modell** geben.

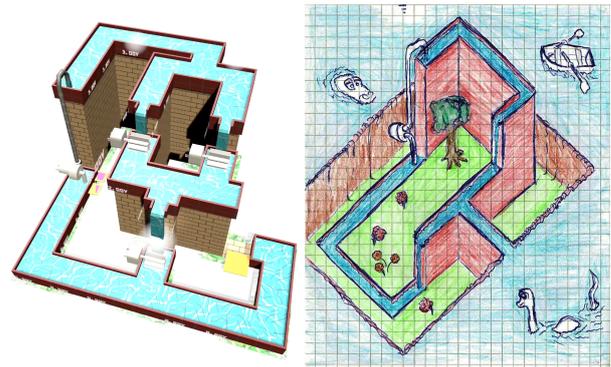
Das Grundgerüst der Applikation wurde nach einer langen Lernphase von benötigten Kenntnissen umgesetzt. Momentan steht eine visuell verbesserte Darstellung der Bauelemente in meinem Fokus. Alle Elemente müssen diesem neuen optischen und technischen Standard angepasst werden. Ich bin erleichtert, dass in der aktuellen Entwicklungsphase endlich sämtliche Aspekte berücksichtigt werden konnten, die ich zu Beginn des Projekts gern gesehen hätte.

## 7 Besonderheiten

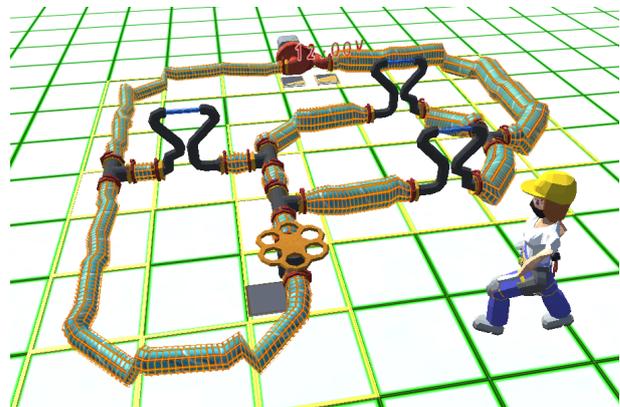
Als Besonderheit dieses Projekts würde ich die enge Verzahnung verschiedener Arbeitsbereiche einschätzen. Beispielsweise allein die Idee eines Bauelements zu haben, reicht nicht für die Umsetzung aus. Man muss programmieren können, um das Element entsprechend einbinden zu können. Das Element selbst kann viele Concept-Art Schritte durchgehen, bis es letztendlich mit einem 3D Programm designed werden kann. Und selbst da können weitere, unerwartete Iterationsschritte benötigt werden, weil aus didaktischer Sicht bei der ersten Zeichnung bestimmte Aspekte nicht ersichtlich waren. Als Einzelperson findet bei mir mittlerweile hier ein fließender Übergang zwischen diesen benötigten Baustellen statt. Das heißt, ich werde in vielen dieser Kategorien nicht auf das Niveau eines beruflichen Fachmanns kommen, komme aber dafür kontinuierlich vorwärts ohne Kommunikationsprobleme.



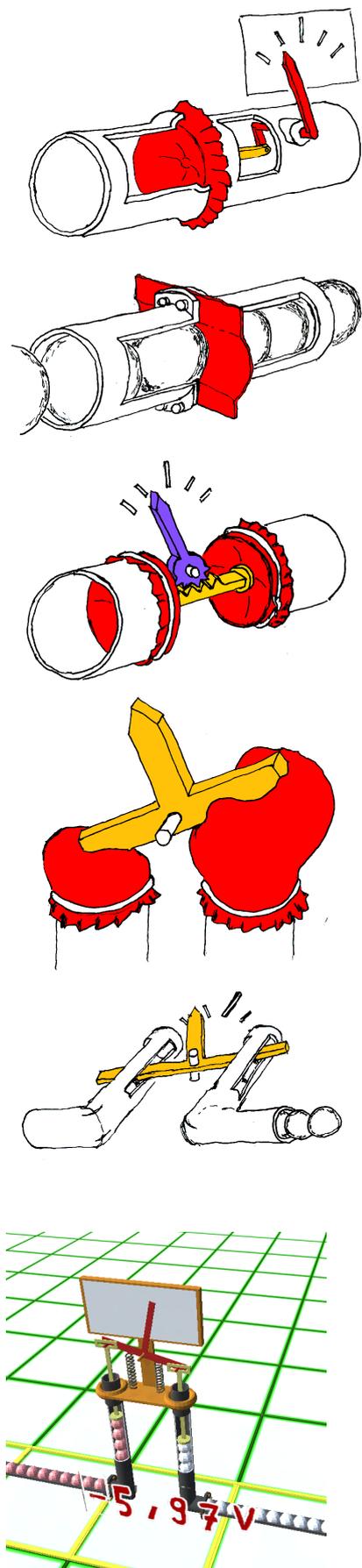
**Abb. 12**  
Provisorische Einschätzung der Besonderheit dieses Projekts.



**Abb. 13**  
Links: Ein Schaltkreis im Wasserfallmodell. Rechts: Concept Art Sketch mit Betonung der Erdung.



**Abb. 14**  
Ein Schaltkreis im Wasserschlauchmodell. Betonenswert ist die unterschiedliche Dicke der Schlauchbereiche. Der Schlauch ist halbtransparent mit einem Gittermuster, um den Durchfluss besser darzustellen.



**Abb. 15**

Exemplarisch ist hier ein Teil des Entwicklungsprozesses des Voltmeters dargestellt.

## 8 Zusammenfassung

In diesem Artikel wird der andauernden Entwicklungsprozess eines mechanischen Modells der Elektrizitätslehre vorgestellt. Wie beim Ei des Columbus kann man im Nachhinein viele Konzepte der Veranschaulichungen als Selbstverständlichkeit auffassen. Der hier geschilderte Aufwand der verworfenen Prototypen und Ansätze soll den Aufwand beschreiben, der dahinter steht, etwas möglichst simpel aussehen zu lassen. Durch geringe Abänderungen, die zunächst möglicherweise sogar kontraproduktiv wirken, können langfristig gravierende Fehlkonzepte vorgebeugt werden. Als Beispiel sei genannt, dass hier die Leitungen vorwiegend einspurig gehalten werden. Dadurch muss keine exakte Definition des Strombegriffs vorausgesetzt werden. Die Betrachtung der Elektronengeschwindigkeit ist in diesem Sonderfall legitim. Ebenfalls sei erwähnt, dass mehrere Bauelemente, wie beispielsweise das Amperemeter und das Voltmeter eine Darstellungsform haben, die als Eselsbrücke fungiert und Aufbaufehler im Schaltplan vermeiden kann. Ein Mehrwert dieses Modells der Elektrizitätslehre gegenüber manchen anderer Modelle besteht darin, dass es die Vorteile eines mechanischen Wasserkreislaufmodells bewahrt und gleichzeitig die Bewegung und den Druck von Wasser auf anderen Repräsentationsebenen wiedergibt. Beispielsweise ist die Bewegung von Kugeln leichter erkennbar, als die von Wasser in einem Schlauch. Der Pumpmechanismus bei Wasser kann in diesem Modell durch ein Druck aufbauendes Zahnrad ersetzt werden. Schwierigkeiten im Verständnisses vom Pumpmechanismus bei echten Wasserpumpen oder deren Skizzen können hier vermieden werden. Dass Animationen im Allgemeinen in einem unterfinanzierten System einen großen Mehrwert gegenüber wartungsintensiver Aufbauten haben, und in vielen Fällen aufgrund der Visualisierung die Thematik besser beschreiben, als ein aufgebauter Vorführversuch, wird in diesem Artikel nicht erwähnt.

Ich hoffe, mich in Zukunft mit dem Projekt für eine Promotionsstelle bewerben zu können. Da die Entwicklung als Freizeitprojekt möglicherweise noch einige Jahre in Anspruch nehmen wird, erwähne ich dieses Projekt bereits jetzt mit dem aktuellen Stand.

Hier wurde sowohl ein Einblick in die Entwicklung des Konzepts gegeben, als auch ein sehr kurzer Einblick in die technische Umsetzung. Obwohl es zum Zeitpunkt dieses Artikels keine fertige Vollversion gibt, wollte ich bereits das bisherige Konzept erwähnen. Eine ältere Version kann momentan unter [marblemodel.com](http://marblemodel.com) betrachtet werden.