

## Elektrisches Feld im Gleichstromkreis

### 1. Didaktisches Konzept

Das Themengebiet Gleichstromkreise wird im Physikunterricht der Sekundarstufe II meist ohne das Feldkonzept eingeführt. Stromkreise werden dementsprechend nur stationär bzw. im Gleichgewichtszustand betrachtet. Dadurch wird erstens die Chance vergeben, Gleichstromkreise als Anwendungsbeispiel für die Grundprinzipien der Feldtheorie zu nutzen. Zweitens führt diese Vorgangsweise dazu, dass viele Schüler\*innen inadäquate Vorstellungen über Gleichstromkreise haben und falsche Kausalbeziehungen aufstellen.

Das hier vorgestellte Unterrichtskonzept orientiert sich an den Vorschlägen von Härtel (2012), Müller (2012a, 2012b) bzw. Chabay & Sherwood (2011) und basiert auf folgenden didaktischen Prinzipien:

- Das elektrische Feld, welches von der Spannungsquelle und von Oberflächenladungen hervorgerufen wird, folgt dem Verlauf des Gleichstromkreises und ist für den Fluss der Elektronen verantwortlich. Ein Feedbackmechanismus zwischen Oberflächenladungen und elektrischem Feld ist dafür verantwortlich, dass sich das elektrische Feld an die jeweiligen Veränderungen, wie ein veränderter Drahtverlauf oder ein zusätzlich eingebauter Widerstand, anpasst. Lokales Denken und die sequenzielle Betrachtung beim Analysieren eines Gleichstromkreises soll durch das Verständnis über die Entstehung des elektrischen Feldes im Stromkreis verhindert werden.
- Werden Gleichstromkreise mit dem elektrischen Feld behandelt, lässt sich der Potentialbegriff bzw. die elektrische Spannung analog zur Elektrostatik einführen und kann konsistent ausgebaut werden. Dadurch können die Regeln für das Potential (Höhenmodell), wie sie vielleicht aus der Unterstufe bekannt sind, abgeleitet und die Potentialdifferenz an einem elektrischen Widerstand begründet werden. Durch diese Vorgangsweise lassen sich die Konzepte Potential und elektrische Spannung nachhaltig einführen. Unserer Erfahrung nach, können Schüler\*innen mithilfe von Potentialbalken Gleichstromkreise besser analysieren.

### 1.2 Vertiefende bzw. ergänzende Literatur

Chabay & Sherwood (2011): Matter & Interactions (3rd ed.)  
John Wiley & Sons, Inc.

H. Härtel (2012): Spannung und Oberflächenladungen  
Praxis der Naturwissenschaft – Physik in der Schule, 2012, Heft 5

R. Müller (2012a): Was ist Spannung?  
Praxis der Naturwissenschaft – Physik in der Schule, 2012, Heft 5

R. Müller (2012b): A semiquantitative treatment of surface charges in DC circuits  
American Journal of Physics 2012, 80(9)

### 1.3 Verankerung im Unterricht

Der Unterrichtsvorschlag ist für zwei Unterrichtseinheiten konzipiert. In welcher Schulstufe der Sekundarstufe II bzw. in welchem Semester dieser Unterrichtsvorschlag eingesetzt wird ist abhängig von der Wochenstundenzahl in der Oberstufe bzw. autonomen Lehrplänen.

Bei mehr als 7 Wochenstunden:

6. Klasse, Kompetenzmodul 4: Grundlagen der Elektrizität (Einfacher Stromkreis) und Felder

Bis zu 7 Wochenstunden:

7. Klasse, Kompetenzmodul 5.

Das Thema Gleichstromkreise (6. Klasse, Kompetenzmodul 4) wird nochmals aufgegriffen und als Beispiel für die Interaktionen Feld/Materie bzw. Materie/Feld durchgenommen.

## 2. Einzelne Sequenzen des Unterrichts

### 1. Einstieg und Motivation

In dieser Sequenz werden benötigte Inhalte aus der Elektrizitätslehre wiederholt und die Beschäftigung mit den Quellen des elektrischen Feldes in Gleichstromkreisen motiviert.

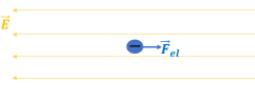
Folie 1: Wiederholung Coulombkraft (elektrische Kraft)

Wiederholung: Elektronen im elektrischen Feld

Auf eine Probeladung  $q$  im elektrischen Feld (mit Feldstärke  $\vec{E}$ ) wirkt eine Kraft:

$$\vec{F}_{el} = q \cdot \vec{E}$$

Ist die Probeladung ein Elektron trägt es die Ladung  $q = -e$ . Die Kraft auf das Elektron führt also dazu, dass das Elektron in entgegengesetzte Richtung des elektrischen Felds beschleunigt wird.



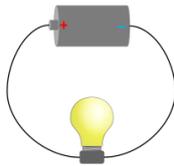
## Folie 2: Wiederholung der Begriffe Stromdichte und Stromstärke

### Wiederholung: Elektrischer Strom

- Elektronen bewegen sich mit einer konstanten mittleren Driftgeschwindigkeit  $v$  durch den Draht eines Gleichstromkreises.
- Die elektrische Stromstärke  $I$  ist ein Maß für die Ladungsmenge, die pro Sekunde durch den Leiterquerschnitt fließt.
- Die Stromdichte  $j$  ist ein Maß für die Ladungsmenge, die pro Sekunde und pro Flächeneinheit durch den Leiter fließt ( $j = I/A$  bzw.  $I = j \cdot A$ ).
- Stromdichte:  $j = \sigma \cdot E = n \cdot q \cdot v$  bzw. Stromstärke:  $I = \sigma \cdot E \cdot A = n \cdot q \cdot v \cdot A$

## Folie 3: Wer oder was ist für den Elektronenfluss verantwortlich?

### Einfacher Gleichstromkreis



Wird der Stromkreis geschlossen fließen Elektronen und die Lampe leuchtet.

Wer oder was ist für den Elektronenfluss verantwortlich?

3

### Bemerkung:

Die Schüler\*innen sollen wenn möglich Vermutungen äußern, die von der Lehrkraft gesammelt werden. Anschließend können die Vermutung mit der Klasse diskutiert werden.

## Folie 4: Elektrisches Feld führt zur konstanten Driftgeschwindigkeit der Elektronen

### Elektrisches Feld im Gleichstromkreis

- Konstante elektrische Stromstärke  $\Leftrightarrow$  konstanten mittleren Driftgeschwindigkeit  $v$  der Elektronen
- Da die Elektronen ständig durch Stöße abgebremst werden, muss eine Kraft sie immer wieder beschleunigen.
- Um die Elektronen in den Bauteilen des Gleichstromkreises zu bewegen ist also eine **konstante Kraft** erforderlich.
- Diese Kraft wird durch ein elektrisches Feld hervorgerufen ( $F = q \cdot E$ ), das dem Drahtverlauf folgt. Die Elektronen werden durch die Kraft entgegengesetzt zur Feldrichtung beschleunigt.



Wer ruft dieses elektrische Feld hervor??

4

### Zusammenfassung dieser Folie:

*L: Die konstante mittlere Driftgeschwindigkeit der Elektronen in einem Gleichstromkreis wird durch eine Kraft hervorgerufen, die wiederum durch ein elektrisches Feld verursacht wird. Die elektrische Feldstärke ist im gesamten Leiter gleich groß und folgt immer der*

*Richtung des Drahtes. Die Frage ist nun, wer ruft dieses elektrische Feld in einem Gleichstromkreis hervor?*

Bemerkungen:

Die Schüler\*innen sollen wenn möglich Vermutungen äußern, die von der Lehrkraft gesammelt werden. Anschließend können die Vermutung mit der Klasse diskutiert werden.

Unserer Erfahrung nach wird von den Schüler\*innen oft die Spannungsquelle genannt. Die Spannungsquelle allein kann aber nicht das benötigte elektrische Feld hervorrufen. Sonst müsste bei einem einfachen geschlossenen Stromkreis die elektrische Stromstärke von der Geometrie des Stromkreises abhängen.

Weitere Fragen für die Diskussion innerhalb der Klasse:

Fangen in einem Stromkreis, der gerade geschlossen wird, alle Elektronen gleichzeitig zum „Wandern“ an?

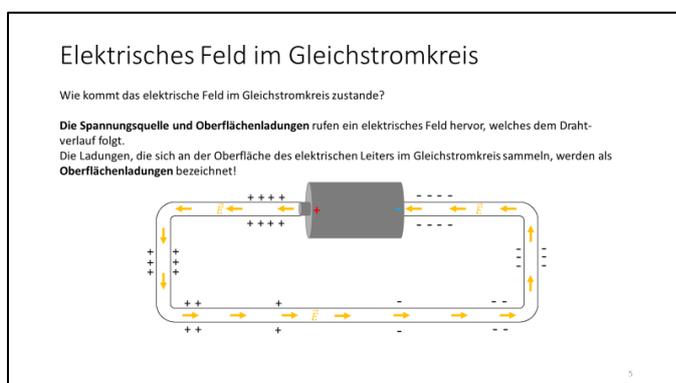
Woher wissen die Elektronen in einem Knotenpunkt, was kommen wird?

Elektronen nehmen immer den Weg des geringsten Widerstandes. Warum?

## 2. Oberflächenladungen

In dieser Sequenz wird der Begriff der Oberflächenladungen eingeführt. Die Oberflächenladungen rufen gemeinsam mit dem Feld der Spannungsquelle das elektrische Feld in einem Gleichstromkreis hervor. Bei den ersten Betrachtungen wird auf einen zusätzlichen eingebauten Widerstand verzichtet. Daher wird der Verbindungsdraht nicht als idealer Leiter betrachtet, sondern weist selbst einen nicht zu vernachlässigenden Widerstand auf. Die Verteilung der Oberflächenladungen wird sowohl in einem geschlossenen als auch in einem offenen Stromkreis dargestellt.

### Folie 5: Oberflächenladungen und elektrisches Feld



Bemerkungen:

Die Verteilung der Oberflächenladung ist selbst für einfache Stromkreise äußerst komplex (siehe Abb. 1).

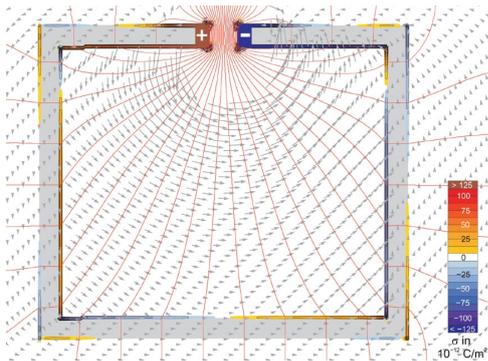
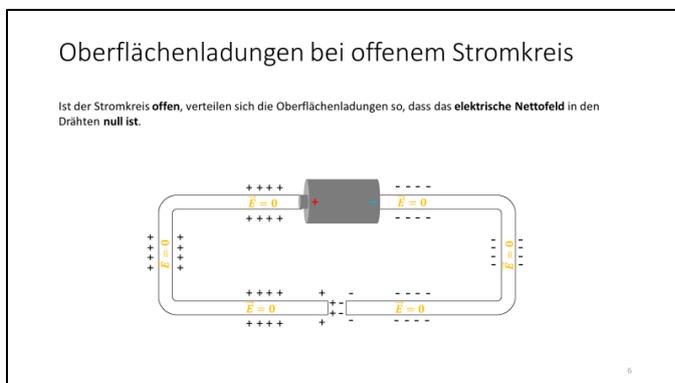


Abb. 1: Elektrisches Feld, Äquipotentiallinien und Oberflächenladungen in einem Stromkreis  
Quelle: Müller (2012a)

Ziel des Unterrichtskonzepts ist es, dass Schüler\*innen die Spannungsquelle und die Oberflächenladungen als Quellen des elektrischen Feldes in einem Gleichstromkreis betrachten. Für dieses Verständnis ist die genaue Kenntnis der Oberflächenladungsdichten nicht zwingen notwendig. Daher wird im Unterrichtskonzept die Verteilung der Oberflächenladungen nur vereinfacht und schematisch dargestellt, wie dies auch im Lehrbuch von Chabay & Sherwood der Fall ist. In der Sequenz „Selbstregulation durch Feedback-Mechanismus“ wird diese Problematik nochmals aufgegriffen und mit den Schüler\*innen diskutiert.

### Folie 6: Offener Stromkreis



### 3. Aufbau des elektrischen Feldes beim Schließen des Stromkreises

In dieser Sequenz wird von einem offenen Stromkreis ausgegangen, wobei vor allem die „Lücke“ genauer betrachtet wird. Genau diese Stelle spielt eine entscheidende Rolle beim Schließen des Stromkreises. Von dieser Stelle aus startet die Umverteilung der Oberflächenladungen und hier ist erstmals die Feldstärke ungleich null. In weiterer Folge breitet sich das elektrische Feld über den gesamten Stromkreis aus.

## Folie 7: Elektrisches Feld beim offenen Stromkreis

Oberflächenladungen bei offenem Stromkreis

- Die Ladungen, die sich auf den Schnittflächen befinden, erzeugen ein elektrisches Feld (gelb).
- Die Oberflächenladungen auf dem Draht rufen ebenfalls ein elektrisches Feld hervor (blau).
- Das elektrische Nettofeld ist daher gleich null.

## Folie 8: Neutralisation der Ladungen an den Schnittflächen

Schließen des Stromkreises

Wird der Stromkreis geschlossen, neutralisieren sich die Ladungen der Schnittflächen. Ihr elektrisches Feld verschwindet.

Es bleibt das elektrische Feld  $\vec{E}_{\text{Oberfläche}}$  übrig, das durch Oberflächenladungen entlang des Drahtes erzeugt wird.

## Folie 9: Verringerung der Ladungsdichte auf der Oberfläche

Aufgrund des übrig gebliebenen Feldes der Oberflächenladungen wandern Elektronen von der Oberfläche weg (rechte Seite der Abbildung) bzw. zur Oberfläche hin (linke Seite). Zudem werden Elektronen auch entlang des Leiters beschleunigt. Elektronen, die in den positiv geladenen Bereich der Oberfläche einfließen bzw. Elektronen, die den negativ geladenen Bereich der Oberfläche verlassen, sorgen für eine stetige Verringerung des Ladungsüberschusses an der Oberfläche.

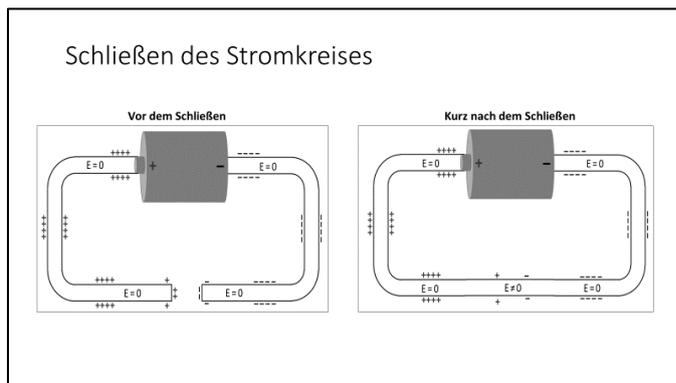
Schließen des Stromkreises

Elektronen wandern sowohl ...  
von der Oberfläche weg  
bzw. zur Oberfläche hin.

Dieser Elektronenfluss sorgt für eine **stetige Verringerung des Ladungsüberschusses an der Oberfläche**.

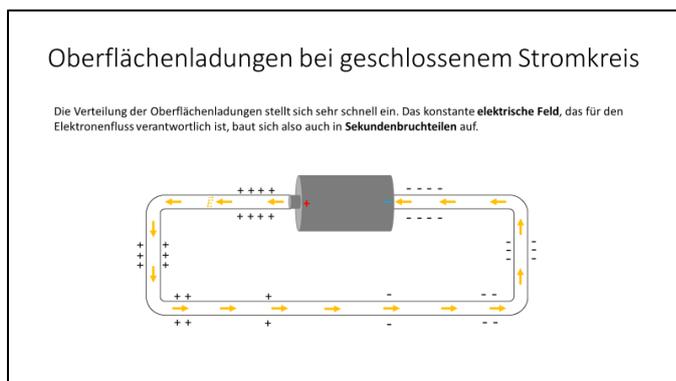
Diese Umverteilung der Oberflächenladungen pflanzt sich in **Sekundenbruchteilen** über den gesamten Stromkreis fort.

## Folie 10: Gegenüberstellung eines offenen und gerade geschlossenen Stromkreises



## Folie 11: Darstellung der Verteilung der Oberflächenladungen im stationären Zustand

Wie in Folie 5 wird nochmals die Verteilung der Oberflächenladungen für den stationären Zustand stark vereinfacht und schematisch dargestellt.



## 4. Selbstregulation durch Feedback-Mechanismus

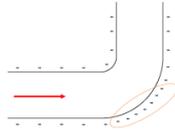
In dieser Sequenz wird nun thematisiert, dass die Verteilung der Oberflächenladungen in den Abbildungen auf Folien 5 und 11 nur vereinfacht und qualitativ dargestellt sind. Den Ausgangspunkt bildet hier eine beliebige Stelle in einem Stromkreis, an der eine zusätzliche Biegung hervorgerufen wird.

*L: Die Verteilung der Oberflächenladungsdichte ist in dieser Abbildung (Folie 11) sehr vereinfacht dargestellt. Tatsächlich wird die Ladungsdichte nicht so kontinuierlich entlang des Leiters abnehmen. Lokal gibt es Abweichungen, vor allem an Stellen, an denen der Draht gebogen ist. Warum das so ist wird klar, wenn wir folgende Situation betrachten.*

## Folie 12:

### Feedback-Mechanismus

- Ein gerades Leiterstück, in dem Elektronen beispielsweise nach rechts fließen, wird gebogen.
- Dadurch wandern die Elektronen zur Kurvenaußenseite.
- Die Dichte der Elektronen an der Außenseite steigt nun so lange bis sie groß genug ist um ein elektrisches Feld hervorzurufen, welches der Leitergeometrie folgt, sodass nachfolgende Elektronen der Kurve folgen.
- **Oberflächenladungen** und **elektrisches Feld** unterliegen einem **Feedback-Mechanismus**. Dadurch wird sichergestellt, dass das elektrische Feld immer der Leitergeometrie folgt.



## 5. Effekte bei zusätzlichem Widerstand

Der Feedback-Mechanismus ist auch bei zusätzlichen Widerständen von zentraler Bedeutung. Welche Effekte durch den Einbau eines zusätzlichen Widerstandes auftreten, wird anhand zweier Widerstandsmodelle diskutiert. Zuerst dient ein Draht, der aus dem gleichen Material ist wie die anderen Verbindungsdrähte, aber einen wesentlich dünneren Querschnitt aufweist. Als zweites Widerstandsmodell dient ein Draht, der zwar die gleiche Querschnittsfläche wie die anderen Drähte hat, aber aus einem Material mit einer wesentlich kleineren Leitfähigkeit besteht. Für beide Modelle wird die elektrische Feldstärke im Widerstand höher sein als im restlichen Gleichstromkreis.

## Folie 13: Widerstand mit kleinerer Querschnittsfläche

### Feedbackmechanismus bei einem Widerstand

Zur Erinnerung:  $I = \sigma \cdot E \cdot A$  bzw.  $I = n \cdot q \cdot v \cdot A$

1. Widerstand in Form eines Drahtstückes mit kleinerer Querschnittsfläche



$$I = \text{konst.}$$
$$A_1 > A_2 \Rightarrow v_1 < v_2 \Rightarrow E_1 < E_2$$

## Folie 14: Widerstand mit geringerer Leitfähigkeit

Feedbackmechanismus bei einem Widerstand

Zur Erinnerung:  $I = \sigma \cdot E \cdot A$  bzw.  $I = n \cdot q \cdot v \cdot A$

2. Widerstand in Form eines Drahtstückes mit geringerer Leitfähigkeit

$I = \text{konst. und } A = \text{konst.}$   
 $I = \sigma \cdot E \cdot A$   
 $\sigma_1 > \sigma_2 \Rightarrow E_1 < E_2$

In Folie 15 wird nun die elektrische Feldstärke an verschiedenen Punkten eines Gleichstromkreises, der einen zusätzlich eingebauten Widerstand aufweist, dargestellt.

## Folie 15: Feldstärke im Gleichstromkreis mit zusätzlichem Widerstand

Feedback-Mechanismus bei einem Widerstand

Wird ein Widerstand eingebaut, kommt es zur Umverteilung der Oberflächenladungen durch einen Feedback-Mechanismus, sodass die elektrische Feldstärke im Widerstand zunimmt und im Kabel abnimmt, bis sich eine gleichgroße Stromstärke einstellt.

## Folie 16: Zusammenfassung über Feedback-Mechanismus

Feedback-Mechanismus

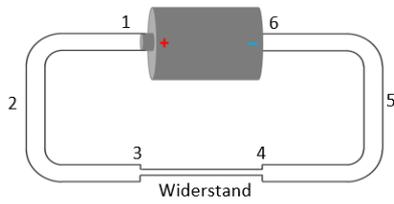
Durch das Prinzip des Feedback-Mechanismus **regelt** sich also ein **Gleichstromkreis** von selbst.

Wird in einem Gleichstromkreis das **konstante elektrische Feld** durch einen äußeren Eingriff in irgendeiner Weise **verändert** (z.B. durch den Einbau eines Widerstands oder durch die Veränderung der Leitergeometrie), **ordnen** sich die **Oberflächenladungen** so an, dass sich wieder ein konstanter elektrischer Strom einstellt. Die elektrische Feldstärke kann dabei in einzelnen Leiterabschnitten unterschiedlich groß sein.

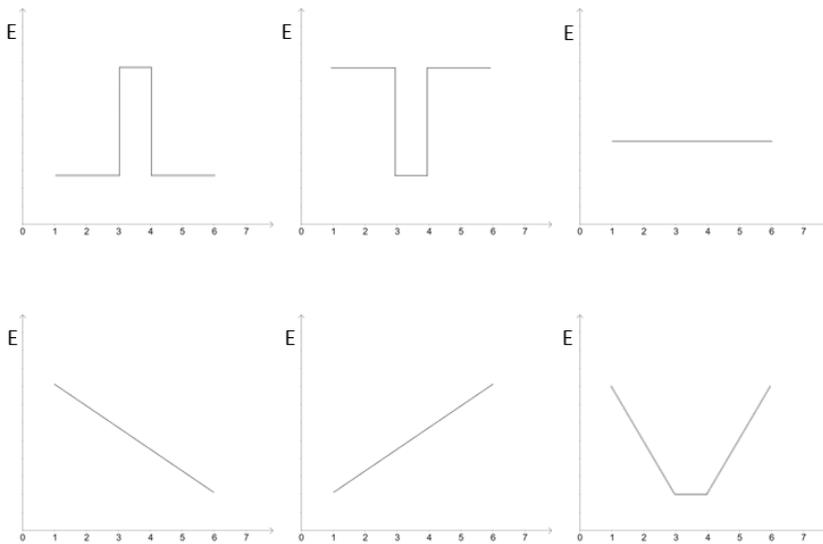
Beispiel zur Festigung:

Die Schüler\*innen sollen im folgenden Beispiel jeweils die passende Darstellung identifizieren und ihre Wahl begründen. [Lösung: a) Diagramm 1 b) Diagramm 1]

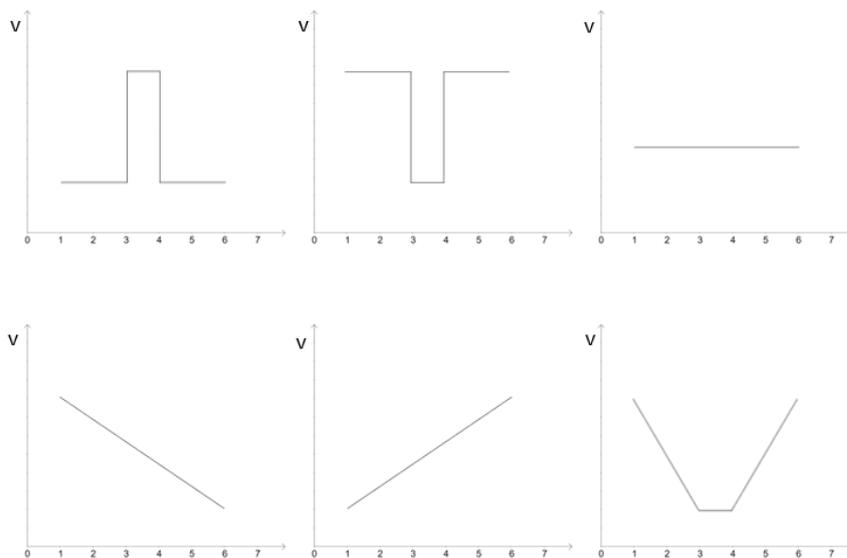
Folgende Abbildung zeigt einen Gleichstromkreis mit einem eingebauten Widerstand. Der Widerstand besteht aus dem gleichen Material wie die anderen Verbindungsdrähte, hat aber eine kleinere Querschnittsfläche.



a) Kreuzen Sie jenes Diagramm an, welches die Feldstärke  $E$  in den Punkten 1 bis 6 wiedergibt!



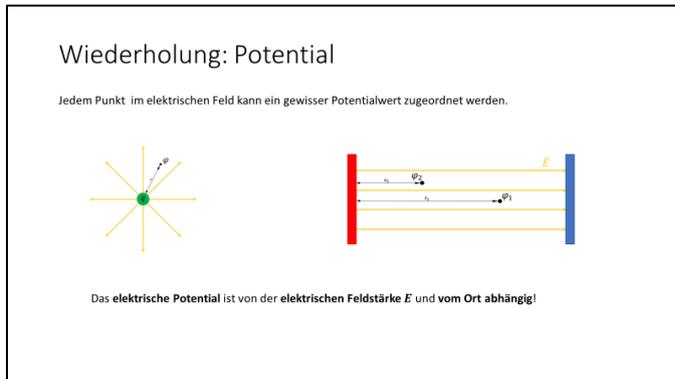
b) Kreuzen Sie jenes Diagramm an, welches die mittlere Driftgeschwindigkeit  $v$  in den Punkten 1 bis 6 wiedergibt!



## 6. Potential und elektrische Spannung im Gleichstromkreis

In diesem Abschnitt soll der Potentialbegriff nochmals kurz wiederholt und das Potentialkonzept auf Gleichstromkreise übertragen werden.

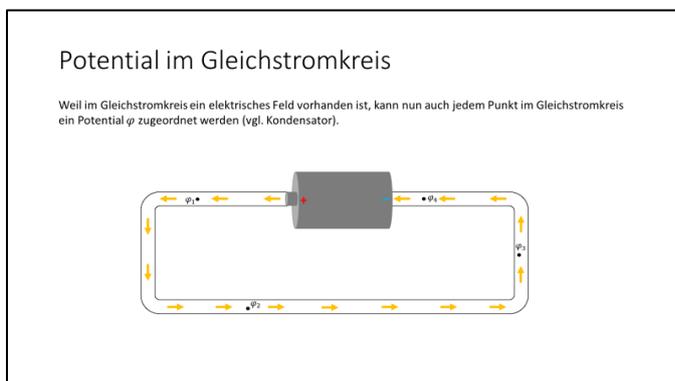
### Folie 17: Wiederholung des Potentialbegriffs



### Bemerkung:

Idealerweise wird der Potentialverlauf für beide Beispiele (Punktladung und Kondensator) graphisch dargestellt.

### Folie 18: Potential im Gleichstromkreis



Es folgt ein Schüler\*innen-Versuch, in dem der Potentialverlauf in Analogie zu einem Kondensator bzw. zu einem Drahtstück eines Gleichstromkreises untersucht werden kann. Die Idee zu diesem Versuch stammt von Dvořák & Planinšič. Nähere Informationen dazu finden Sie unter:

[https://www.univ-reims.fr/site/evenement/girep-icpe-mptl-2010-reims-international-conference/gallery\\_files/site/1/90/4401/22908/29321/29497.pdf](https://www.univ-reims.fr/site/evenement/girep-icpe-mptl-2010-reims-international-conference/gallery_files/site/1/90/4401/22908/29321/29497.pdf)

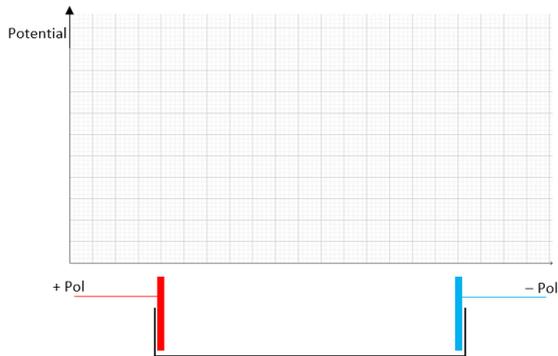
## Versuch: Potentialdifferenz

Material: 2 Stück Alufolie, Spannungsversorgung (ca. 12 V), 2 Verbindungskabel, 2 Krokodklemmen, LED, wassergefüllt Kunststoffschale

Aufgabenstellung:

a) Untersuchen Sie den Potentialverlauf in der „Wasserschale“. Als Indikator für die Potentialdifferenz verwenden Sie die LED.

b) Skizzieren Sie den ungefähren Potentialverlauf in folgender Abbildung:



## Lösungserwartung:

a)

Abbildung A: LED-Anschlüsse weit auseinander und in Richtung +/- Pol → LED leuchtet und zwar unabhängig davon, wie weit die LED vom + bzw. - Pol entfernt ist.

Abbildung B: Berührt ein LED-Anschluss den + oder - Pol → LED leuchtet noch heller

Abbildung C: LED um 90° drehen oder Anschlüsse nahe beieinander → LED leuchtet nicht



b)



## Folie 19: Potentialverlauf ohne zusätzlichen Widerstand

Potential im Gleichstromkreis

Das Potential in einem einfachen Stromkreis (mit hochohmigen Draht) nimmt vom Pluspol hin zum Minuspol linear ab!

Das Potential kann durch Balken dargestellt werden, deren Höhe ein Maß für den Potentialwert ist.

## Folie 20: Potentialverlauf mit zusätzlichem Widerstand

Potentialverlauf bei zusätzlichem Widerstand

In einem Widerstand ist die elektrische Feldstärke größer als im restlichen Kabel.

Das Potential nimmt am Widerstand stärker ab als im restlichen Kabel.

### Bemerkung:

Um im Anschluss die Regeln für den Potentialverlauf besprechen zu können, muss hier der Begriff eines idealen Leiters thematisiert werden.

*L: Ist der Widerstand der Verbindungsdrähte im Vergleich zum zusätzlich eingebauten Widerstand sehr klein, kann die Potentialdifferenz entlang der Drähte vernachlässigt werden. Die Verbindungsdrähte können daher als ideale Leiter betrachtet werden. In diesem Fall wird am Widerstand die Potentialdifferenz 10 V betragen.*

## Folie 21: Regeln für das Potential in einem Gleichstromkreis

Regeln für das Potential in Gleichstromkreisen

<b>Regel 1:</b>	Die elektrische Spannung entspricht dem Potentialunterschied.
<b>Regel 2:</b>	Am Pluspol einer Spannungsquelle ist der Potentialwert größer als am Minuspol (meist mit 0 V angenommen).
<b>Regel 3:</b>	Entlang eines (idealen) Kabels ändert sich der Potentialwert nicht.
<b>Regel 4:</b>	Ist der Stromkreis geschlossen, nimmt das Potential an einem Widerstand entsprechend dem Ohm'schen Gesetz ab.

Alle Gleichstromkreise sollten im Anschluss mit den hier vorgestellten Regeln für das Potential in einem Gleichstromkreis analysiert werden. Idealerweise sind diese Regeln schon aus der Sekundarstufe I bekannt.

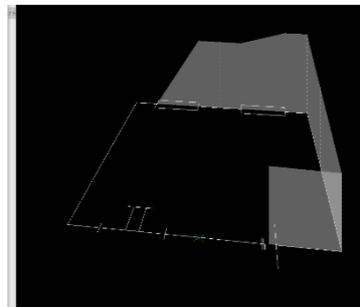
Informationen zum Einsatz der Potentialbalken bzw. Höhenmodell in der Sekundarstufe I finden Sie auf folgender Homepage (Universität München, Didaktik der Physik) bzw. im folgenden Schulbuch:

- [https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt\\_materialien/einf\\_elektrizitaet/index.html](https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/einf_elektrizitaet/index.html)
- Expedition Physik 3, Theorieteil (E.DORNER Verlag)

Folgende Programme stellen graphisch den Verlauf des Potentials dar und eignen sich daher sehr gut für die Analyse von Gleichstromkreisen:

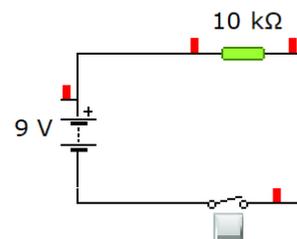
- **CLOC** (Conceptual Learning Of Circuits) von Hermann Härtel

<http://www1.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/>



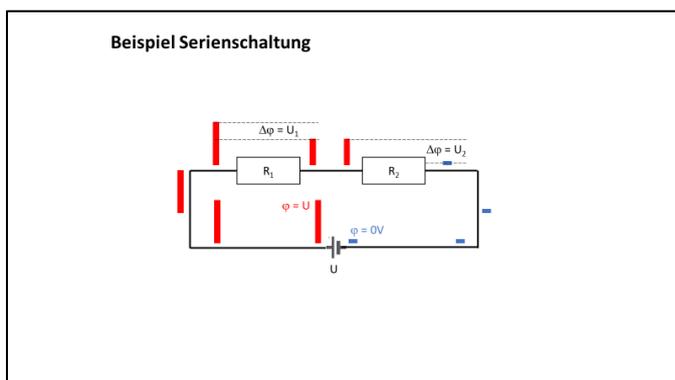
- **Yenka** (oder die Vorgängerversion "Crocodile Physics")

<https://www.yenka.com/>

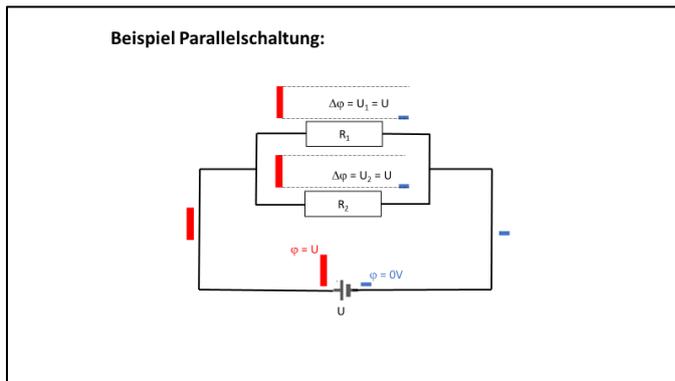


In den folgenden beiden Folien werden die Potentialverläufe bei einer Serien- bzw. Parallelschaltung thematisiert und durch Potentialbalken dargestellt. Abschließend folgt noch ein Beispiel zur Festigung. Die Lösungserwartung ist auf Folie 24 dargestellt.

Folie 22: Potentialbalken und Spannung bei einer Serienschaltung



## Folie 23: Potentialverlauf und Spannung bei einer Parallelschaltung

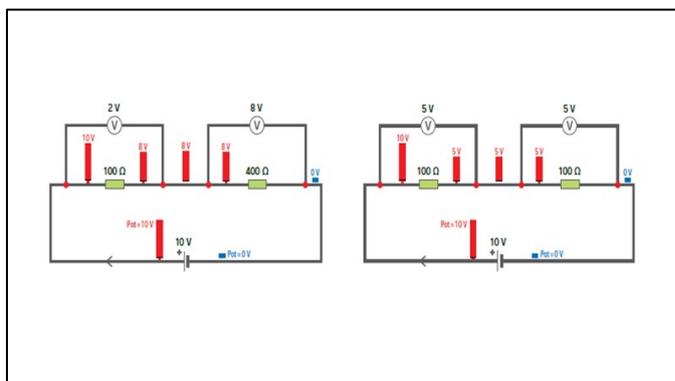


### Beispiel zur Festigung:

In den folgenden zwei Beispielen werden jeweils zwei ohmsche Widerstände seriell an einer Spannungsquelle ( $U = 10V$ ) angeschlossen. Fertigen Sie für beide Fälle eine Schaltskizze an und zeichnen Sie die Potentialbalken samt Angabe des Potentialwertes ein.

- Serienschaltung zweier Widerstände mit  $R_1 = 100\Omega$  und  $R_2 = 400\Omega$
- Serienschaltung zweier Widerstände mit  $R_1 = R_2 = 100\Omega$

## Folie 24: Grafische Darstellung der Lösung



### 3. Einzelne Folien des Unterrichtsvorschlags

Wenn Sie die Folien als PowerPoint Präsentation haben möchten, richten Sie bitte ein Mail an:

wolfgang.aschauer@ph-ooe.at

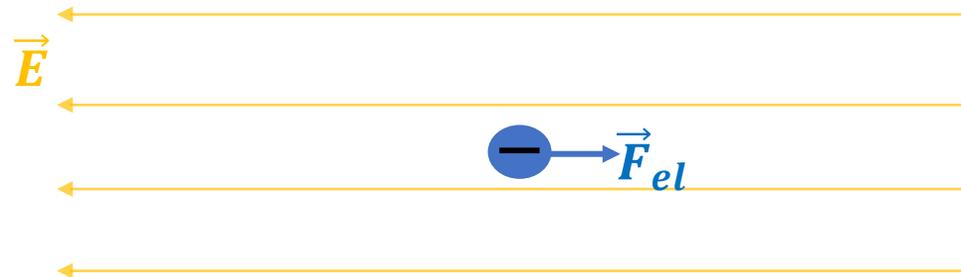
# Gleichstromkreise

# Wiederholung: Elektronen im elektrischen Feld

Auf eine Probeladung  $q$  im elektrischen Feld (mit Feldstärke  $\vec{E}$ ) wirkt eine Kraft:

$$\vec{F}_{el} = q \cdot \vec{E}$$

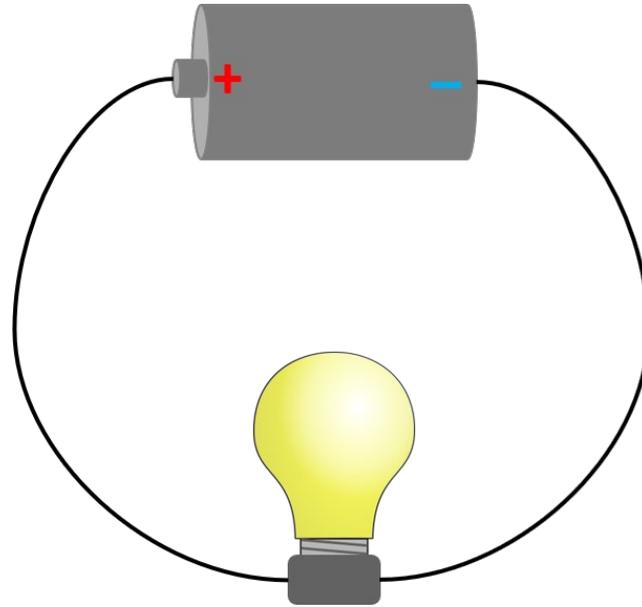
Ist die Probeladung ein Elektron trägt es die Ladung  $q = -e$ . Die Kraft auf das Elektron führt also dazu, dass das Elektron in entgegengesetzte Richtung des elektrischen Felds beschleunigt wird.



# Wiederholung: Elektrischer Strom

- Elektronen bewegen sich mit einer konstanten mittleren Driftgeschwindigkeit  $v$  durch den Draht eines Gleichstromkreises.
- Die elektrische Stromstärke  $I$  ist ein Maß für die Ladungsmenge, die pro Sekunde durch den Leiterquerschnitt fließt.
- Die Stromdichte  $j$  ist ein Maß für die Ladungsmenge, die pro Sekunde und pro Flächeneinheit durch den Leiter fließt ( $j = I/A$  bzw.  $I = j \cdot A$ ).
- Stromdichte:  $j = \sigma \cdot E = n \cdot q \cdot v$  bzw. Stromstärke:  $I = \sigma \cdot E \cdot A = n \cdot q \cdot v \cdot A$

# Einfacher Gleichstromkreis

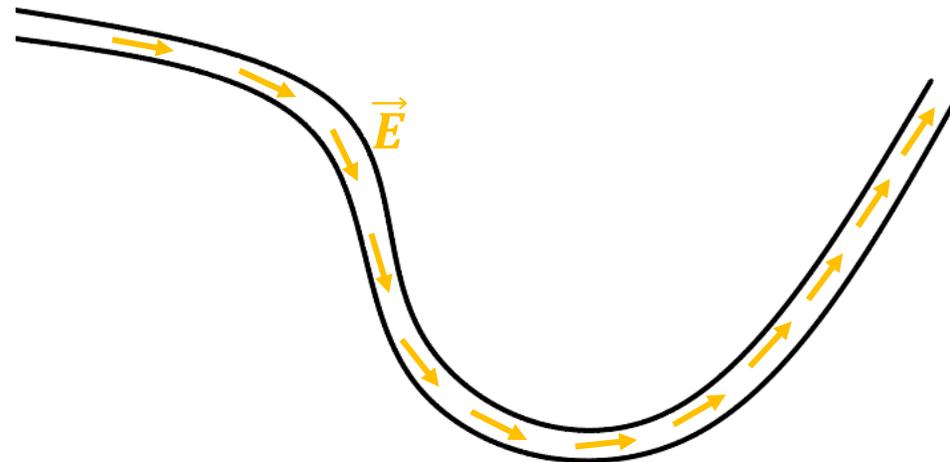


Wird der Stromkreis geschlossen fließen Elektronen und die Lampe leuchtet.

**Wer oder was ist für den Elektronenfluss verantwortlich?**

# Elektrisches Feld im Gleichstromkreis

- Konstante elektrische Stromstärke  $\Leftrightarrow$  konstante mittleren Driftgeschwindigkeit  $v$  der Elektronen
- Da die Elektronen ständig durch Stöße abgebremst werden, muss eine Kraft sie immer wieder beschleunigen.
- Um die Elektronen in den Bauteilen des Gleichstromkreises zu bewegen ist also eine konstante Kraft erforderlich.
- Diese Kraft wird durch ein elektrisches Feld hervorgerufen ( $F = q \cdot E$ ), das dem Drahtverlauf folgt. Die Elektronen werden durch die Kraft entgegengesetzt zur Feldrichtung beschleunigt.

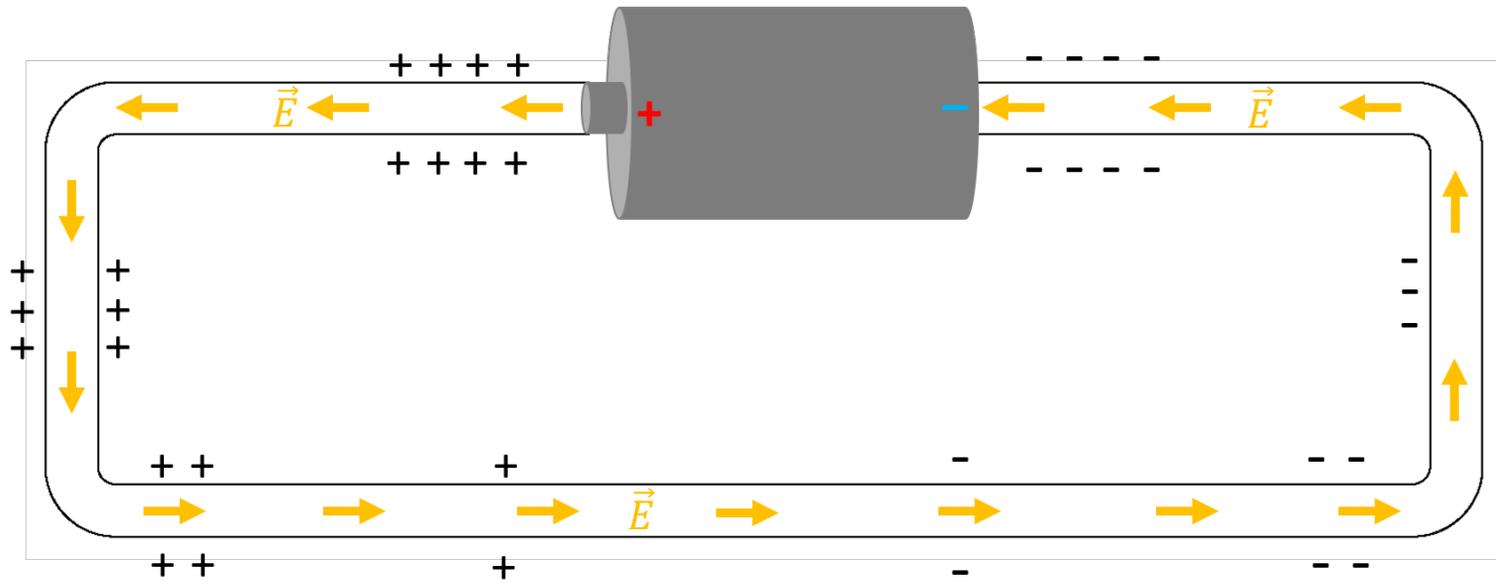


**Wer ruft dieses elektrische Feld hervor??**

# Elektrisches Feld im Gleichstromkreis

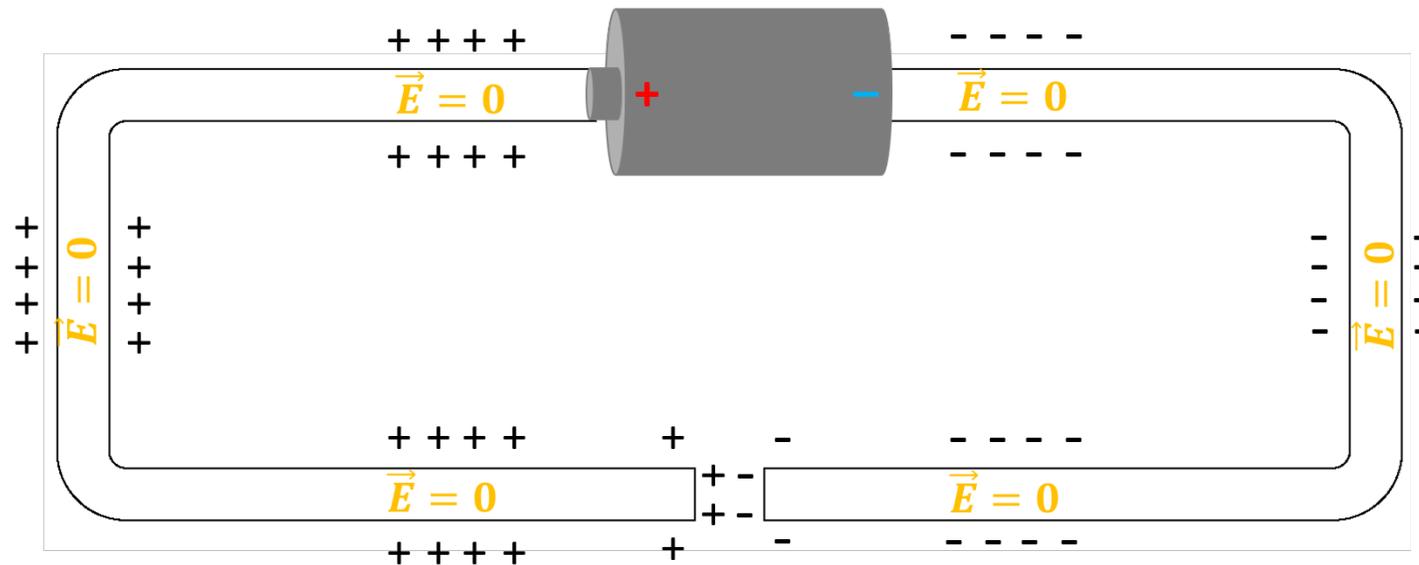
Die **Spannungsquelle und Oberflächenladungen** rufen ein elektrisches Feld hervor, welches dem Drahtverlauf folgt.

Die Ladungen, die sich an der Oberfläche des elektrischen Leiters im Gleichstromkreis sammeln, werden als **Oberflächenladungen** bezeichnet!

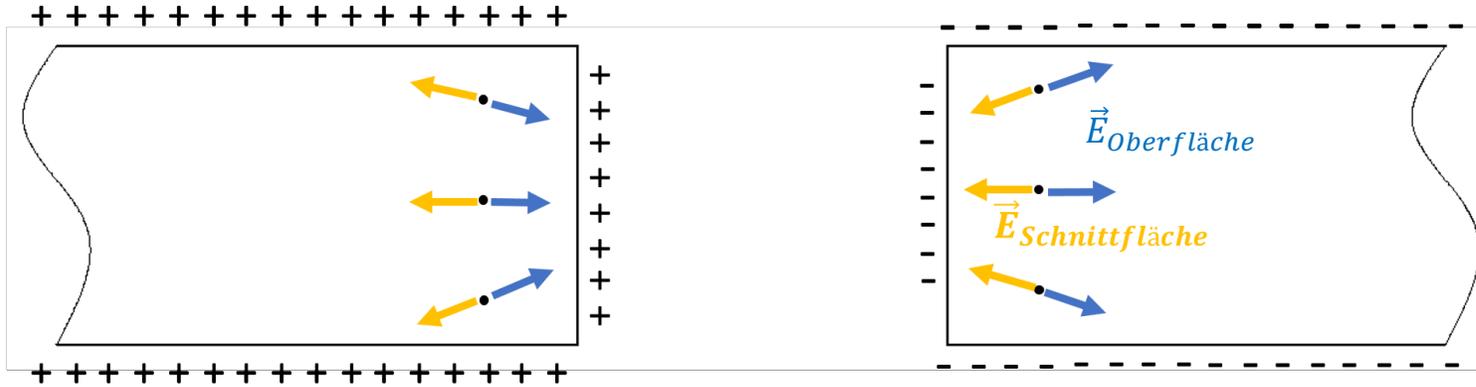


# Oberflächenladungen bei offenem Stromkreis

Ist der Stromkreis offen, verteilen sich die Oberflächenladungen so, dass das elektrische Nettofeld in den Drähten null ist.



# Oberflächenladungen bei offenem Stromkreis

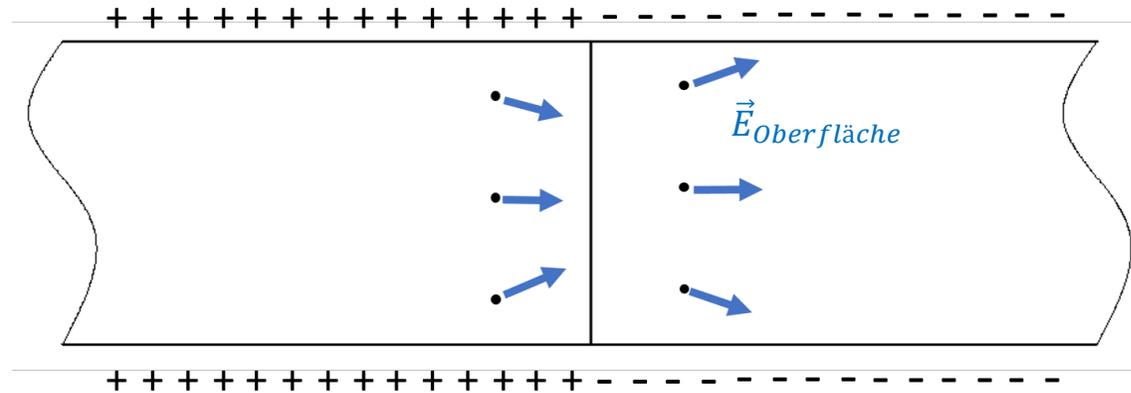


- Die Ladungen, die sich auf den Schnittflächen befinden, erzeugen ein elektrisches Feld (gelb).
- Die Oberflächenladungen auf dem Draht rufen ebenfalls ein elektrisches Feld hervor (blau).
- Das elektrische Nettopfeld ist daher gleich null.

# Schließen des Stromkreises

Wird der Stromkreis geschlossen, neutralisieren sich die Ladungen der Schnittflächen. Ihr elektrisches Feld verschwindet.

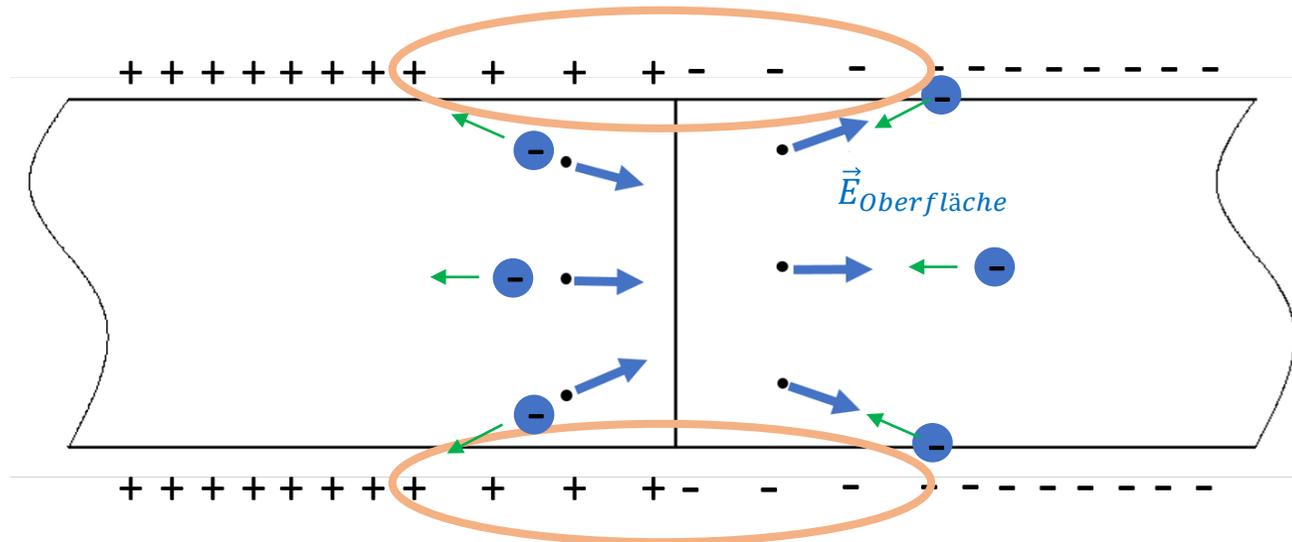
Es bleibt das elektrische Feld  $\vec{E}_{\text{Oberfläche}}$  übrig, das durch Oberflächenladungen entlang des Drahtes erzeugt wird.



# Schließen des Stromkreises

Elektronen wandern sowohl ...  
von der Oberfläche weg  
bzw. zur Oberfläche hin.

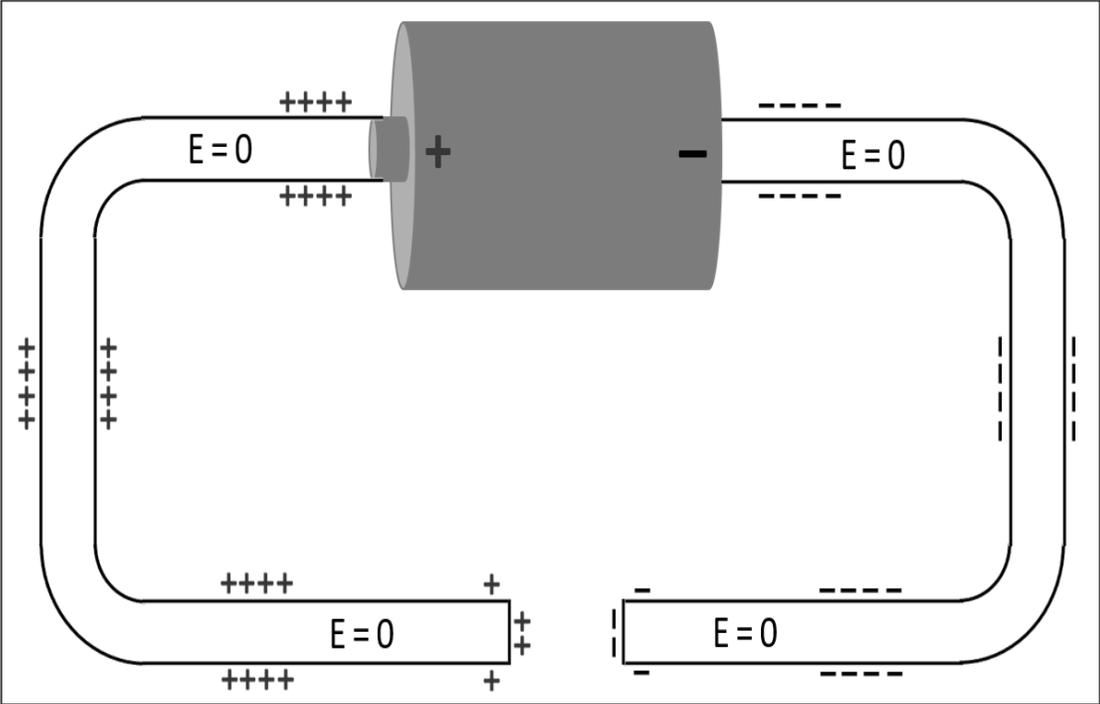
Dieser Elektronenfluss sorgt für eine stetige Verringerung des Ladungsüberschusses an der Oberfläche.



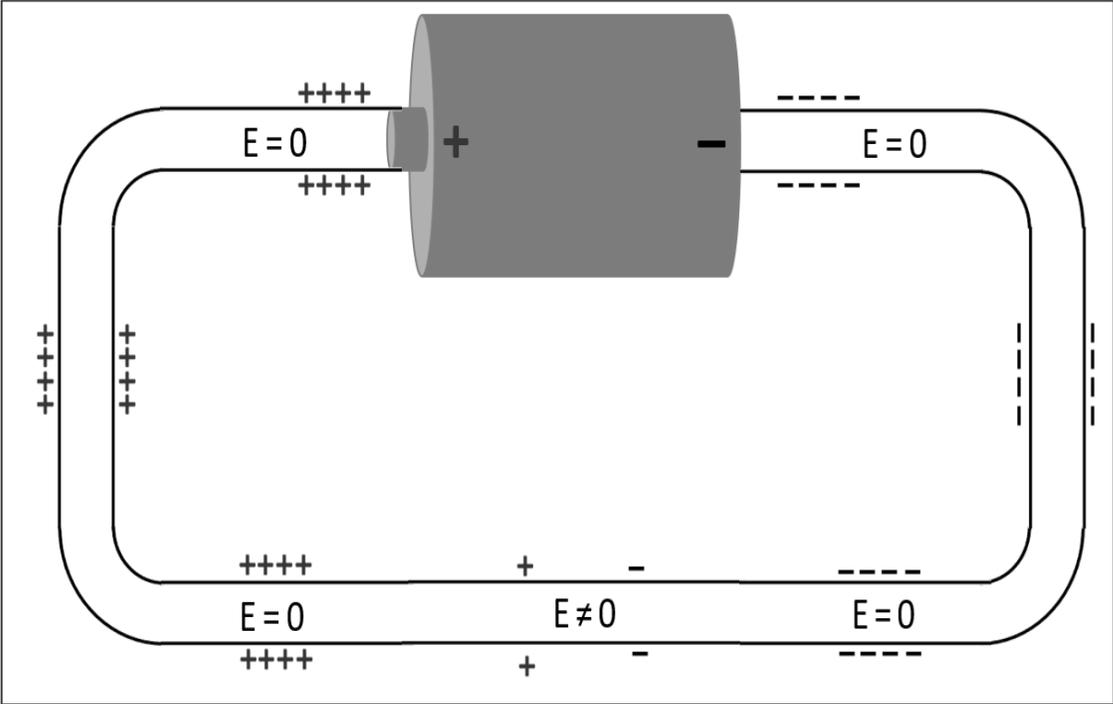
Diese Umverteilung der Oberflächenladungen pflanzt sich in Sekundenbruchteilen über den gesamten Stromkreis fort.

# Schließen des Stromkreises

Vor dem Schließen

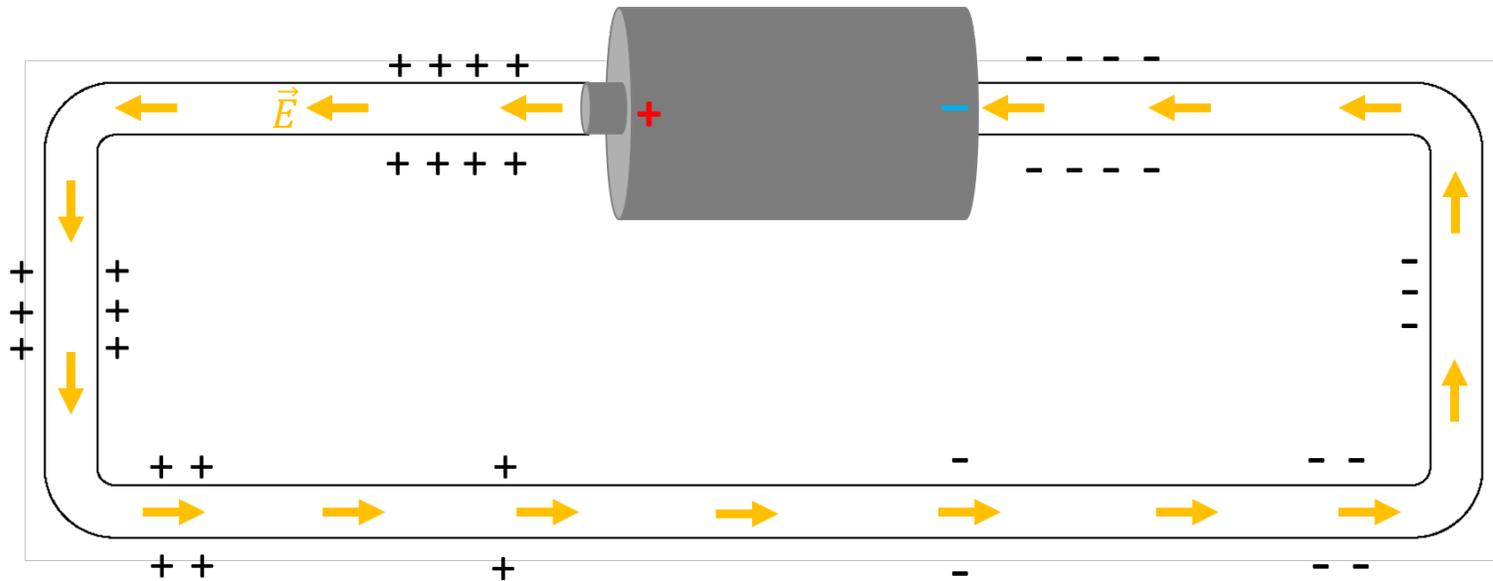


Kurz nach dem Schließen



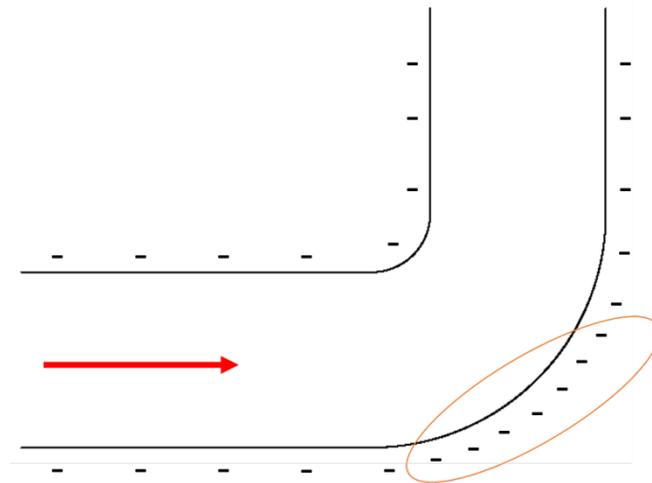
# Oberflächenladungen bei geschlossenem Stromkreis

Die Verteilung der Oberflächenladungen stellt sich sehr schnell ein. Das konstante elektrische Feld, das für den Elektronenfluss verantwortlich ist, baut sich also auch in Sekundenbruchteilen auf.



# Feedback-Mechanismus

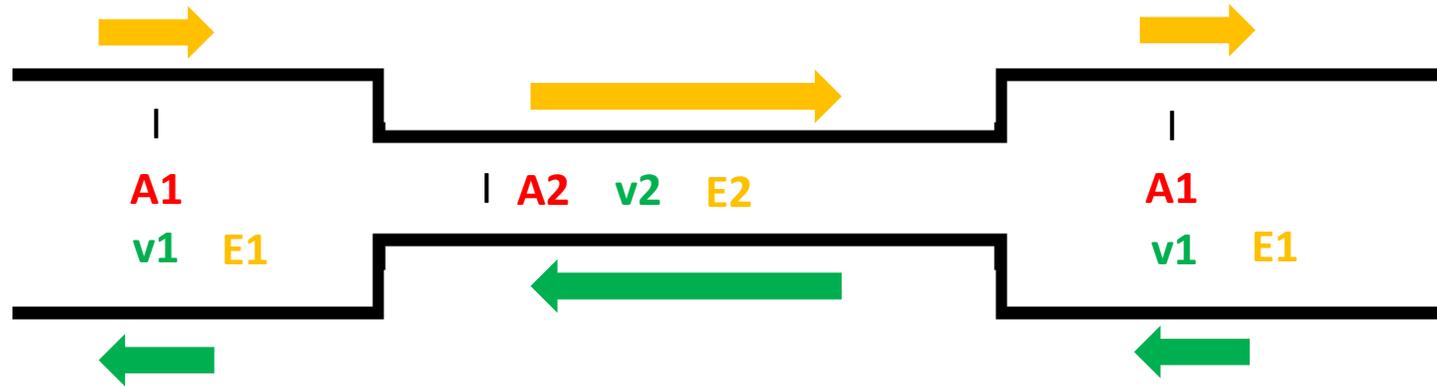
- Ein gerades Leiterstück, in dem Elektronen beispielsweise nach rechts fließen, wird gebogen.
- Dadurch wandern die Elektronen zur Kurvenaußenseite.
- Die Dichte der Elektronen an der Außenseite steigt nun so lange bis sie groß genug ist um ein elektrisches Feld hervorzurufen, welches der Leitergeometrie folgt, sodass nachfolgende Elektronen der Kurve folgen.
- **Oberflächenladungen** und **elektrisches Feld** unterliegen einem **Feedback-Mechanismus**. Dadurch wird sichergestellt, dass das elektrische Feld immer der Leitergeometrie folgt.



# Feedbackmechanismus bei einem Widerstand

Zur Erinnerung:  $I = \sigma \cdot E \cdot A$  bzw.  $I = n \cdot q \cdot v \cdot A$

1. Widerstand in Form eines Drahtstückes mit kleinerer Querschnittsfläche



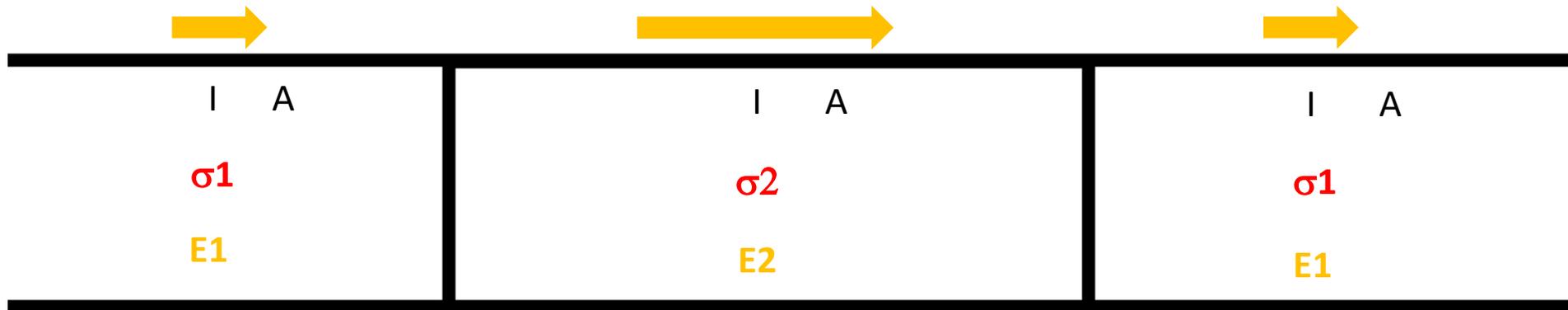
$I = \text{konst.}$

$$A1 > A2 \Rightarrow v1 < v2 \Rightarrow E1 < E2$$

# Feedbackmechanismus bei einem Widerstand

Zur Erinnerung:  $I = \sigma \cdot E \cdot A$  bzw.  $I = n \cdot q \cdot v \cdot A$

2. Widerstand in Form eines Drahtstückes mit geringerer Leitfähigkeit



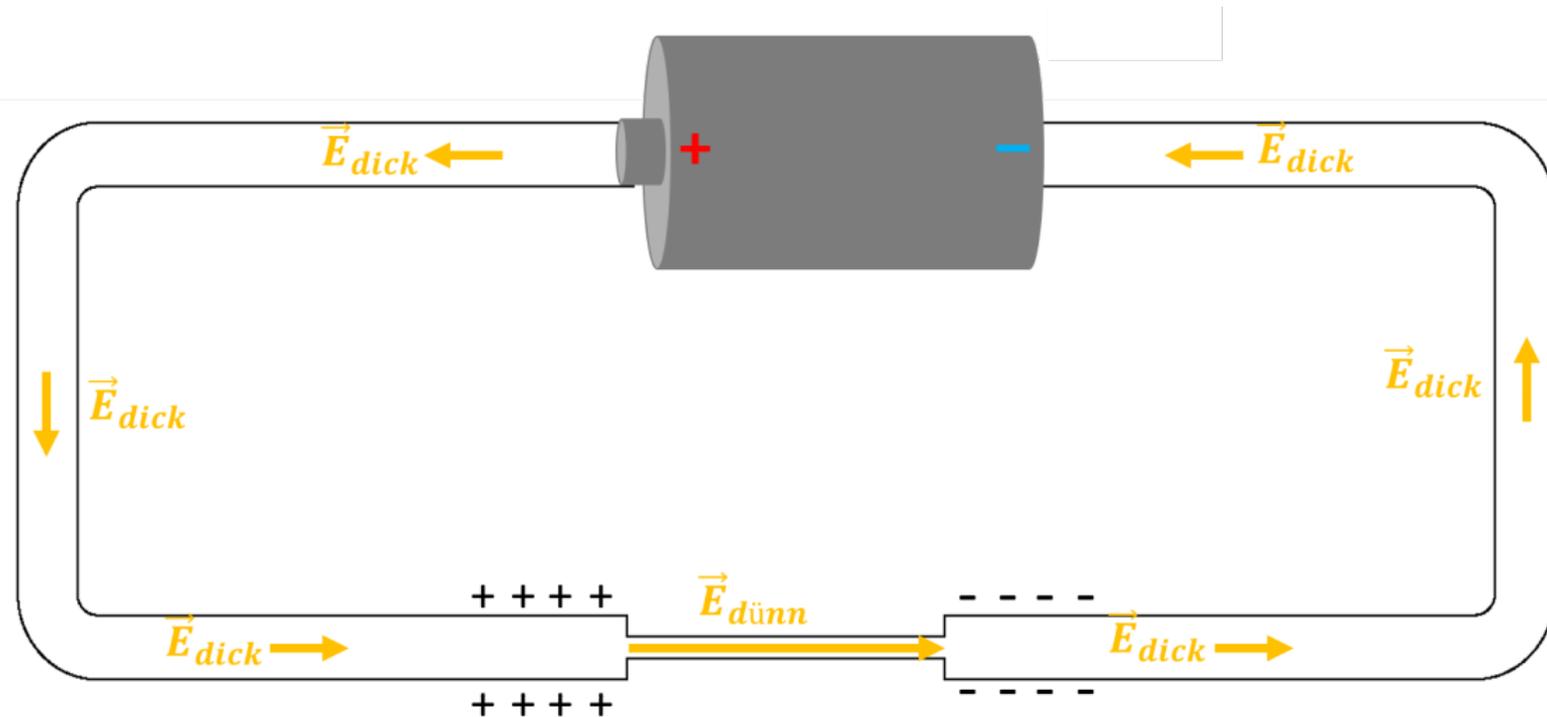
$I = \text{konst.}$  und  $A = \text{konst.}$

$$I = \sigma \cdot E \cdot A$$

$$\sigma_1 > \sigma_2 \Rightarrow E_1 < E_2$$

# Feedback-Mechanismus bei einem Widerstand

Wird ein Widerstand eingebaut, kommt es zur Umverteilung der Oberflächenladungen durch einen Feedback-Mechanismus, sodass die elektrische Feldstärke im Widerstand zunimmt und im Kabel abnimmt, bis sich eine gleichgroße Stromstärke einstellt.



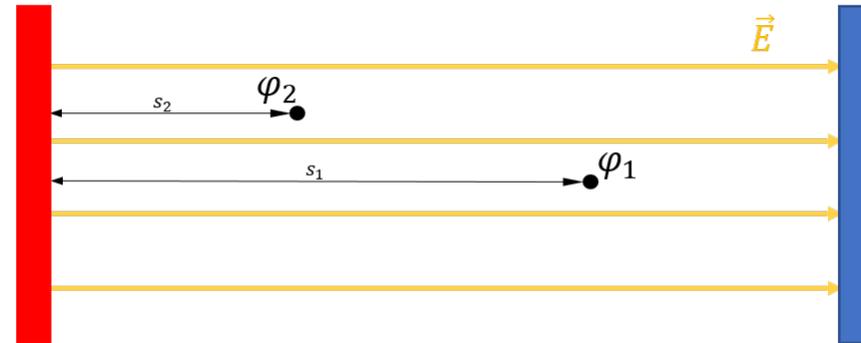
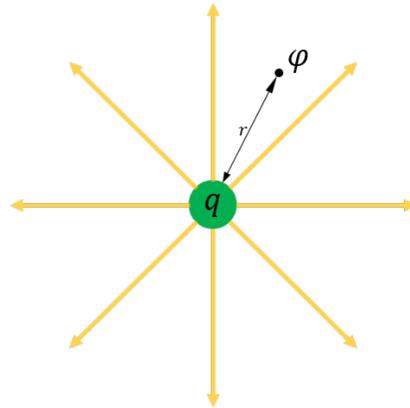
# Feedback-Mechanismus

Durch das Prinzip des Feedback-Mechanismus regelt sich ein Gleichstromkreis von selbst.

Wird in einem Gleichstromkreis das konstante elektrische Feld durch einen äußeren Eingriff in irgendeiner Weise verändert (z.B. durch den Einbau eines Widerstands oder durch die Veränderung der Leitergeometrie), ordnen sich die Oberflächenladungen so an, dass sich wieder ein konstanter elektrischer Strom einstellt. Die elektrische Feldstärke kann dabei in einzelnen Leiterabschnitten unterschiedlich groß sein.

# Wiederholung: Potential

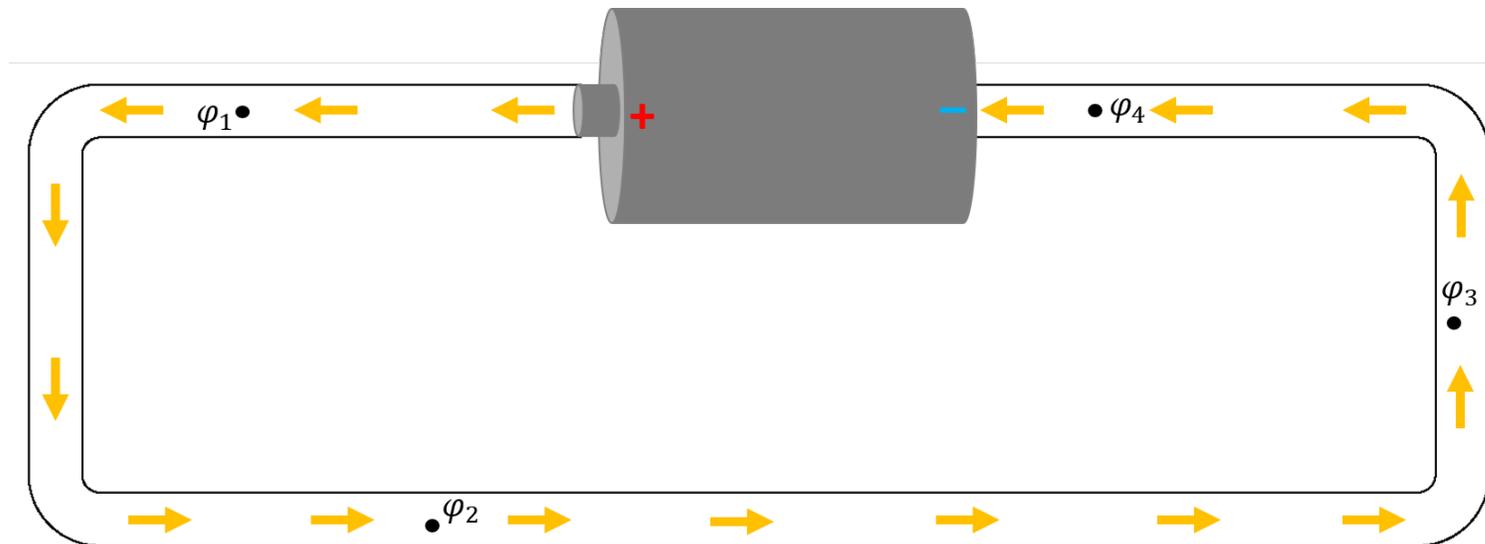
Jedem Punkt im elektrischen Feld kann ein gewisser Potentialwert zugeordnet werden.



Das **elektrische Potential** ist von der **elektrischen Feldstärke  $E$**  und **vom Ort abhängig!**

# Potential im Gleichstromkreis

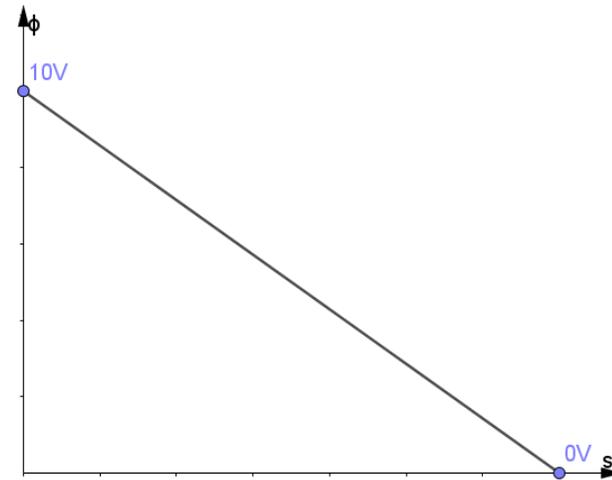
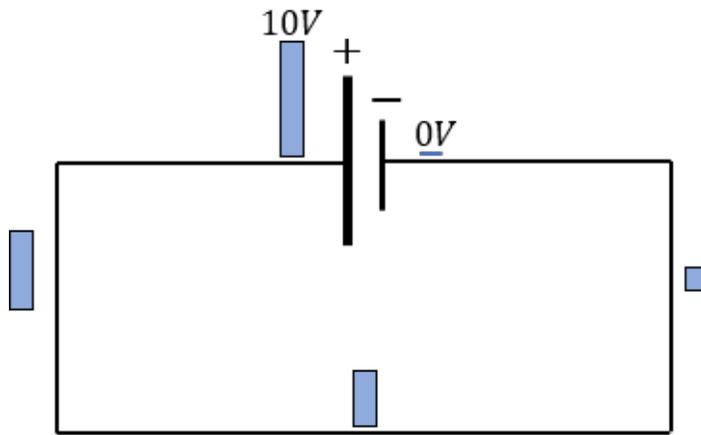
Weil im Gleichstromkreis ein elektrisches Feld vorhanden ist, kann nun auch jedem Punkt im Gleichstromkreis ein Potential  $\varphi$  zugeordnet werden.



# Potential im Gleichstromkreis

Das Potential in einem einfachen Stromkreis nimmt vom Pluspol hin zum Minuspol linear ab!

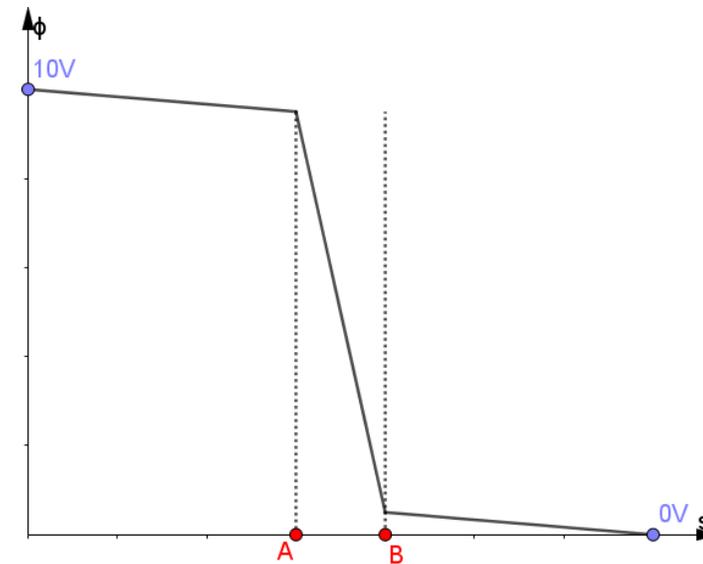
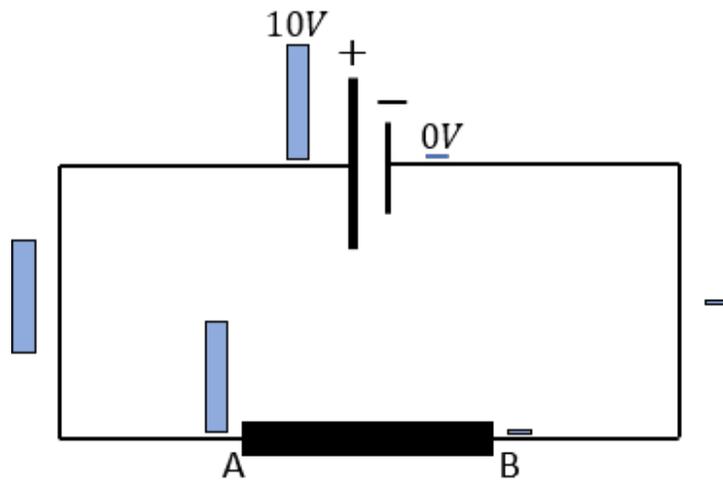
Das Potential kann durch Balken dargestellt werden, deren Höhe ein Maß für den Potentialwert ist.



# Potentialverlauf bei zusätzlichem Widerstand

In einem Widerstand ist die elektrische Feldstärke größer als im restlichen Kabel.

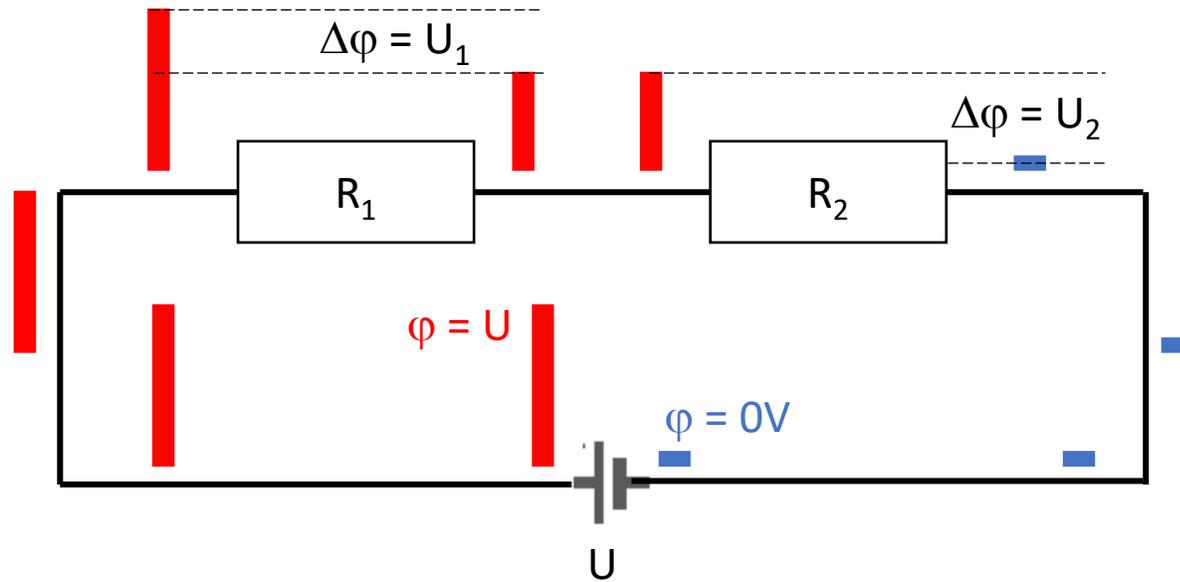
Das Potential nimmt am Widerstand stärker ab als im restlichen Kabel.



# Regeln für das Potential in Gleichstromkreisen

<b>Regel 1:</b>	Die elektrische Spannung entspricht dem Potentialunterschied.
<b>Regel 2:</b>	Am Pluspol einer Spannungsquelle ist der Potentialwert größer als am Minuspol (meist mit 0 V angenommen).
<b>Regel 3:</b>	Entlang eines (idealen) Kabels ändert sich der Potentialwert nicht.
<b>Regel 4:</b>	Ist der Stromkreis geschlossen, nimmt das Potential an einem Widerstand entsprechend dem Ohm'schen Gesetz ab.

# Beispiel Serienschaltung



# Beispiel Parallelschaltung:

