

Elektrische und magnetische Wechselwirkung

Teil 2

Elektrische Felder und Materie

ORCID

Connecting Research
and Researchers

Ziele

Nach Durchsicht dieser Folien solltest du in der Lage sein,

- den Unterschied zwischen einem Leiter und einem Isolator zu erläutern und deren Polarisierung darzustellen, falls diese einem äußeren elektrischen Feld ausgesetzt werden;
- zu erklären, weshalb ein geladenes Objekt von einem neutralen Objekt angezogen wird;
- die Driftgeschwindigkeit eines geladenen Teilchens in einem Leiter zu berechnen;
- zu erklären, weshalb das elektrische Feld in einem Leiter im Gleichgewicht gleich Null sein muss;
- Polarisierbarkeit, induziertes Dipolmoment und angelegtes elektrisches Feld mathematisch in Beziehung zu setzen.

Übersicht

- Geladene Teilchen in Materie
- Wie Objekte eine Ladung erhalten können
- Polarisierung von Atomen
- Polarisierung von (elektrischen) Isolatoren
- Polarisierung von (elektrischen) Leitern
- Ladungsbewegung in Metallen
- Übertragen von Ladung
- Praktische Probleme bei der Messung eines elektrischen Feldes
- Antworten (zu den „Kontrollpunkten“)
- Nachwort

Geladene Teilchen in Materie

Da gewöhnliche Materie aus geladenen Teilchen besteht, können elektrische Felder Materie beeinflussen.

Um die Wirkung elektrischer Felder auf Materie zu verstehen, werden wir in diesem Kapitel unser mikroskopisches Modell der Materie um die Tatsache erweitern, dass Materie geladene Teilchen enthält: Protonen und Elektronen.

Die **Nettoladung** eines Objekts ist die **Summe der Ladungen** aller Teilchen, aus denen es besteht. Ein Objekt mit einer Nettoladung von Null wird als „**neutral**“ bezeichnet. Ein Objekt mit einer Nettoladung ungleich Null (entweder positiv oder negativ) wird als „**geladen**“ bezeichnet.

Elementarteilchen wie Protonen und Elektronen sind elektrisch geladen. Wenn sich jedoch ein Proton und ein Elektron zu einem Wasserstoffatom verbinden, ist das Wasserstoffatom elektrisch „neutral“ - seine Nettoladung ist Null:

$$\begin{array}{ccc} \text{Proton} & \text{Elektron} & \\ (+e) & + & (-e) = 0 \end{array} \quad \text{Nettoladung eines Wasserstoffatoms}$$

Gewöhnliche Materie ist elektrisch neutral. Es ist jedoch möglich, geladene Teilchen zu entfernen oder hinzuzufügen, wodurch ein Objekt eine Nettoladung ungleich Null erhält.

Auch ein Dipol ist (elektrisch) neutral, weil die Summe der Ladungen seiner Bestandteile gleich Null ist. Allerdings, wie wir im vorangehenden Kapitel gesehen haben, kann auch ein neutrales Objekt wie ein Dipol ein elektrisches Feld ungleich Null im umgebenden Raum erzeugen.

Die Nettoladung eines Systems und seiner Umgebung ist konstant.

In einer Vielzahl von Experimenten hat niemand jemals eine Änderung der Nettoladung des Universums beobachtet. Diese Ergebnisse werden durch das grundlegende Prinzip der „Ladungserhaltung“ zusammengefasst: Wenn sich die Nettoladung eines Systems ändert, muss sich die Nettoladung der Umgebung um den entgegengesetzten Betrag ändern. Wenn zum Beispiel dein Kamm eine negative Ladung erhält, erhält dein Haar die gleiche Menge an positiver Ladung.

Erhaltung der elektrischen Ladung

Betrachte die gegenseitige Auslöschung (Annihilation) zwischen einem Elektron und einem Positron:



Bei dieser Reaktion werden ein Elektron und ein Positron zerstört, wobei zwei hochenergetische Photonen entstehen. Verstößt diese Reaktion gegen den Grundsatz der Ladungserhaltung? Nein. Die Nettoladung des Systems (Elektron plus Positron) war ursprünglich Null; die Ladung der beiden Photonen ist ebenfalls Null. Obwohl geladene Teilchen zerstört wurden, blieb die Nettoladung des Universums unverändert.

Kontrollpunkt 1

1. Ein Kohlenstoffatom besteht aus 6 Protonen, 6 Neutronen und 6 Elektronen. (1) Wie hoch ist die Nettoladung dieses Atoms? (2) Ein neutrales Chloratom enthält 17 Protonen und 17 Elektronen. Wenn ein Chloratom ein zusätzliches Elektron erhält, wird es zu einem Chlorid-Ion. Wie groß ist dessen Nettoladung?

Alle Materialien bestehen aus Atomen, die Elektronen und Protonen enthalten. Auf mikroskopischer Ebene kann es jedoch Unterschiede in der Struktur geben, die zu einem sehr unterschiedlichen Verhalten führen, wenn makroskopische Objekte elektrischen Feldern ausgesetzt werden. In diesem Kapitel werden wir zwei verschiedene Arten von Materialien untersuchen: **Leiter** und **Isolatoren**.

Anmerkung: Es gibt noch andere Klassen technologisch wichtiger Materialien, wie z. B. Halbleiter und Supraleiter, die wir in späteren Kapiteln kurz besprechen werden.

Elektrische Leiter

Einige Materialien enthalten geladene Teilchen, die sich leicht durch das Material bewegen können. Diese Materialien werden als Leiter bezeichnet. Die meisten **Metalle**, wie z. B. Kupfer, Silber, Eisen, Aluminium und Gold, sind hervorragende Leiter, da sie sehr mobile Elektronen enthalten, wie wir später noch erläutern werden.

Wässrige **Salzlösungen** sind ebenfalls Leiter, da sie bewegliche positive und negative Ionen enthalten. Ein Beispiel ist gewöhnliches Salzwasser, das positive Natrium-Ionen (Na^+) und negative Chlorid-Ionen (Cl^-) enthält.

Elektrische Isolatoren

In vielen Materialien sind die Elektronen fest an die Atome gebunden, und es gibt keine geladenen Teilchen, die sich durch das Material bewegen können. Diese Materialien werden als Isolatoren bezeichnet, weil sie ein geladenes Objekt von einem anderen elektrisch „isolieren“ können.

Du kennst bestimmt viele isolierende Materialien wie Gummi, Kunststoff, Holz, Papier oder Glas.

Ein **Leiter** enthält **bewegliche geladene Teilchen**, die sich durch das Material bewegen können.

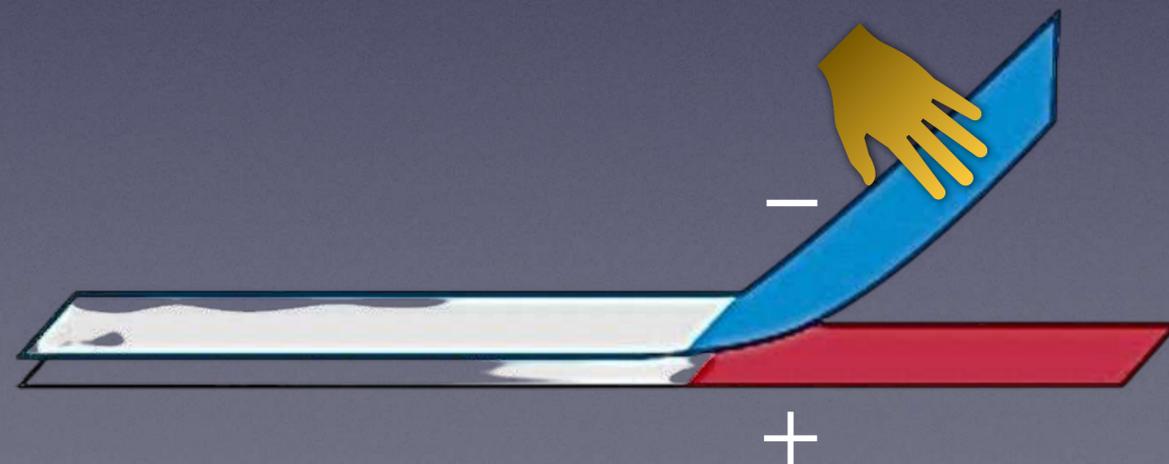
Ein **Isolator** hat keine **beweglichen geladenen Teilchen**.

Definitionen für (elektrische) Leiter und Isolatoren

Wie Objekte eine Ladung
erhalten können

Viele der Wechselwirkungen, die wir in unserem Alltag beobachten, sind elektrischer Natur. Wenn wir das Verhalten einfacher Systeme systematisch beobachten und dieses Verhalten sorgfältig analysieren, können wir einige relevante Fragen über die Wechselwirkung von gewöhnlicher Materie mit elektrischen Feldern aufdecken.

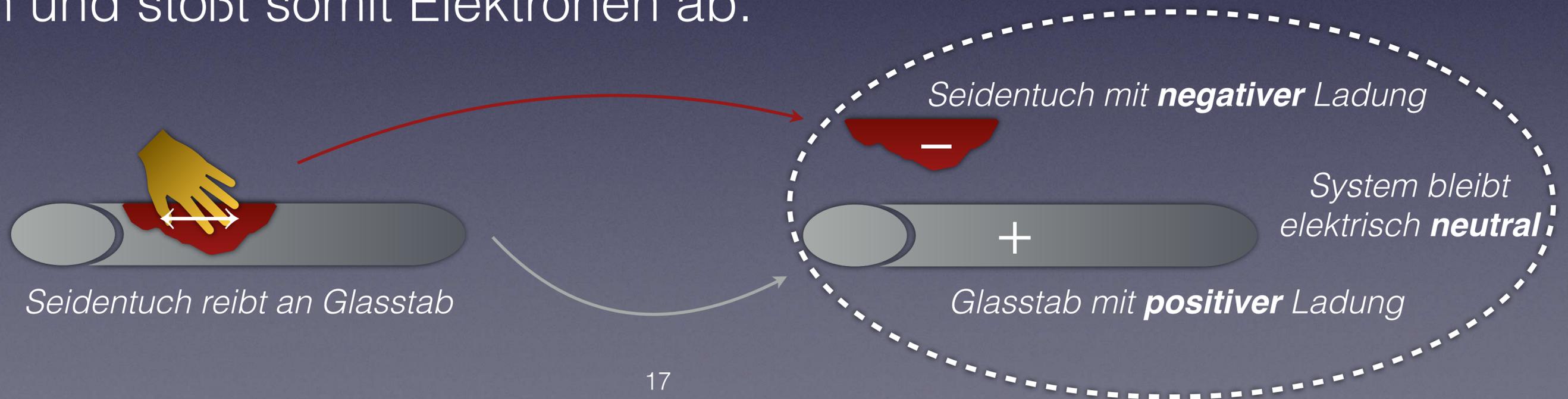
Wenn du ein langes Stück transparentes Klebeband von einer Rolle abziehst, rollt es sich oft auf oder klebt an deiner Hand, was auf die elektrischen Wechselwirkungen zwischen dem elektrisch geladenen Klebeband und deiner Hand zurückzuführen ist.



Ladungstrennung zweier anfänglich neutraler, zusammengeklebter transparenter Klebestreifen durch Lösen der Klebeverbindung. Die Nettoladung ist vor und nach dem Trennen Null.

Ein geladenes Objekt, das eine negative Nettoladung hat, hat mehr Elektronen als Protonen. Ein positiv geladenes Objekt hat weniger Elektronen als Protonen.

Es ist schon lange bekannt, dass, wenn man einen Glasstab mit Seide reibt, der Glasstab positiv und die Seide negativ aufgeladen wird. Wenn man mit einem Kunststoffgegenstand, wie einem Kugelschreiber durch die Haare fährt, wird der Kunststoff negativ geladen und stößt somit Elektronen ab.



Es gibt eine Vielzahl möglicher Mechanismen für die Aufladung bei Kontakt. Große organische Moleküle im Kunststoff oder in deinem Haar können an ihrer schwächsten Bindung zerbrechen, so dass sich negative Ionen auf dem Kunststoff und/oder positive Ionen auf deinem Haar ablagern. **Elektronen können von einem Gegenstand zum anderen wandern**, insbesondere wenn es sich um Metalle handelt, wie wir später noch erläutern werden. Es ist bekannt, dass Reibung für die Übertragung von Ladungen von einem Gegenstand auf einen anderen nicht unbedingt erforderlich ist: Der bloße Kontakt kann ausreichen. Durch Reiben entstehen jedoch viele Kontaktpunkte, was die Ladungstrennung erleichtern kann.

Eines ist sicher: Man kann weder ganze (Atom-) Kerne der Oberflächenatome noch Protonen aus dem Inneren der (Atom-) Kerne der Oberflächenatome durch Reiben entfernen. Die dafür erforderliche Energiemenge wäre enorm. Das Entfernen von Protonen würde darauf hinauslaufen, ein Element in ein anderes umzuwandeln!

Der Kern ist tief im Inneren des Atoms vergraben, und die Protonen sind fest im Kern gebunden. Um ein Elektron aus einem Atom zu entfernen oder eine chemische Bindung zu brechen und ein ganzes Ion auf ein anderes Objekt zu übertragen, ist eine viel geringere Kraft erforderlich. **Daher können nur positive oder negative Ionen bzw. Elektronen durch Kontakt übertragen werden.**

Wir können eine ungefähre Abschätzung geben, welche Energie erforderlich ist, um ein Objekt durch verschiedene Mechanismen aufzuladen: Aufbrechen einer Bindung, Entfernen eines Elektrons aus einem Atom oder Entfernen eines Protons aus einem Kern. In dem Kapitel „Quantisierung der Energie“ haben wir gesehen, dass die Energie, die erforderlich ist, um ein Wasserstoffatom zu ionisieren, etwa 14 eV beträgt. Deshalb können wir die Energie, die erforderlich ist, um ein Elektron aus einem beliebigen Atom zu entfernen, auf einige eV schätzen. In vergleichbarer Weise beträgt die Energie zum Aufbrechen einer Sauerstoff-Wasserstoff-Bindung in Wasser 4.6 eV pro Molekülbindung. Im Gegensatz dazu sind, wie wir in Kapitel „Das Prinzip Energie“ gesehen haben, 2.2 MeV erforderlich, um den Kern eines Deuterium-Atoms zu spalten, der aus einem Proton und einem Neutron besteht.

Vorgang	erforderliche Energie
Aufbrechen einer chemischen Bindung	einige eV
Entfernen eines Elektrons	einige eV
Entfernen eines Protons aus dem Kern	einige MeV

Größenordnung des Energieaufwands für verschiedene Prozesse. Die Zahlen machen klar, dass entweder das Aufbrechen von Bindungen oder das Entfernen einzelner Elektronen ein möglicher Mechanismus für die (elektrische) Aufladung eines makroskopischen Objekts durch Kontakt ist, aber das Entfernen von Protonen aus den Atomkernen ist es nicht.

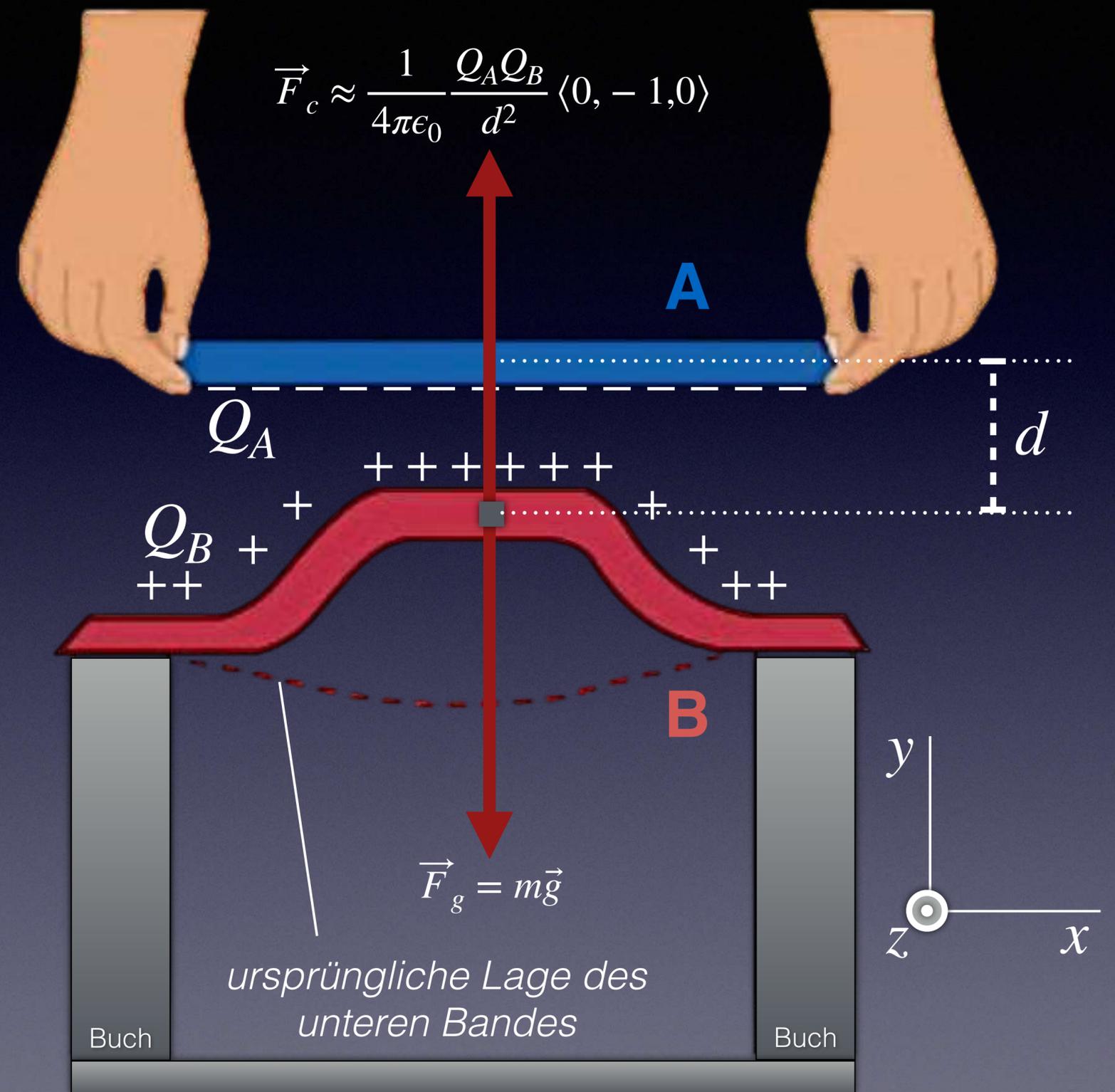
Angenommen, zwei neutrale Streifen transparenten Klebebands werden aneinandergesklebt und dann schnell auseinandergezogen. Beide Klebebänder werden durch diesen Vorgang aufgeladen. Anmerkung: Das Vorzeichen der Ladung auf jedem Band hängt von der chemischen Zusammensetzung des Bandes und des Klebstoffs ab.

Die Bänder interagieren nur entlang der Unterseite des oberen Bandes und der Oberseite des unteren Bandes. Da Kunststoff ein guter Isolator ist, können die Ladungen nicht an eine andere Stelle wandern. Die Teile der Bänder, die getrennt wurden, weisen nun einen Überschuss oder einen Mangel an negativer Ladung auf. Elektronen oder negative Ionen könnten vom unteren zum oberen Band gewandert sein, oder positive Ionen könnten in umgekehrter Richtung gewandert sein.



In diesem Fall wird das obere Band negativ geladen, so dass sich auf dem Teil seiner unteren Oberfläche, der das untere Band nicht mehr berührt, ein Überschuss an Elektronen oder negativen Ionen (Anionen) befinden muss. Für das untere Band gilt das Gegenteil.

Wir können eine grobe Schätzung der überschüssigen Ladung auf einem Stück Klebeband vornehmen, indem wir ein einfaches Experiment durchführen, das nebenstehend dargestellt ist. Bereite ein Paar entgegengesetzt geladener Bänder vor. Wenn wir z.B. das positiv geladene Band **B** zwischen zwei Büchern aufhängen und das negativ geladene Band **A** diesem annähern, werden wir sehen, dass das positive Band nach oben gehoben wird, wenn das negative Band nahe genug herankommt. Wenn wir die Masse des Bandes kennen, können wir die elektrische Kraft, die auf das Band wirkt, abschätzen und daraus die Ladung des Bandes ermitteln



Prinzip Impuls:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_g + \vec{F}_c = \vec{0} \xrightarrow{\text{nur } y\text{-Richtung relevant}} m |\vec{g}| \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_A Q_B|}{d^2} .$$

Mit $Q_B = -Q_A = Q$ folgt:

$$Q \approx d \sqrt{4\pi\epsilon_0 m |\vec{g}|} .$$

Beispiel: Für $m = 0.15 \text{ g}$ und $d = 2.5 \text{ cm}$ erhalten wir $Q \approx 10 \text{ nC}$.

Unter der Annahme, dass die jeweilige Nettoladung Q der Bänder gleichmäßig über ihre Oberflächen ($A_b \approx 20 \text{ cm}^2$) verteilt sind, können wir den Anteil $f = n_e/n_a$ derjenigen Oberflächenatome schätzen, die ein überschüssiges Elektron oder Anion erhalten haben.

$$n_a = \frac{A_b}{A_a} \approx \frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{4 \times 10^{-20} \text{ m}^2} = 5 \times 10^{16} \text{ Atome (auf Bandoberfläche)}$$

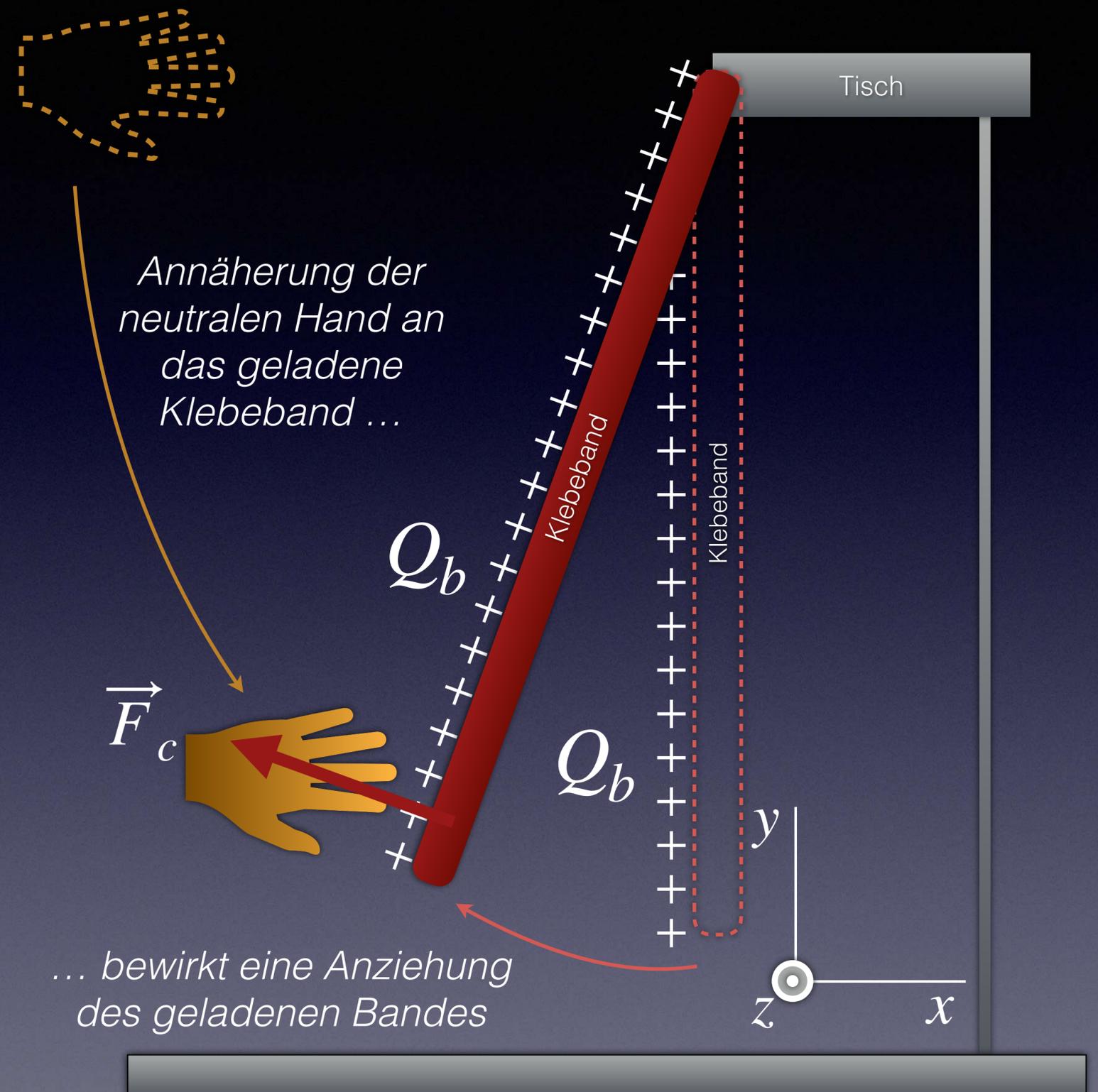
$$n_e = \frac{Q}{e} \approx \frac{10 \times 10^{-10} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 6.25 \times 10^{10} \text{ Atome (geladen)}$$

Man erhält $f \approx 1.25 \times 10^{-6}$. Nur sehr wenige Oberflächenatome sind somit nicht elektrisch neutral.

Polarisierung von Atomen

Ein positiv (oder negativ) geladenes Objekt, wie ein transparentes Klebeband, wird nicht nur von einem negativen (oder positiven) Klebeband angezogen, sondern auch von deiner (neutralen) Hand, deinem Schreibtisch, Buch und jedem anderen neutralen Objekt in der Nähe.

Da $\vec{F}_c = Q_b \vec{E}_h$ gilt, bedeutet dies, dass deine neutrale Hand ein elektrisches Feld \vec{E}_h ungleich $\vec{0}$ erzeugen muss. Es ist nicht in trivialer Weise klar, wie oder warum dies passieren kann.



Die Anziehungskraft von positiv und negativ geladenem transparentem Klebeband auf deine Hand und auf viele andere neutrale Objekte bleibt zunächst rätselhaft.

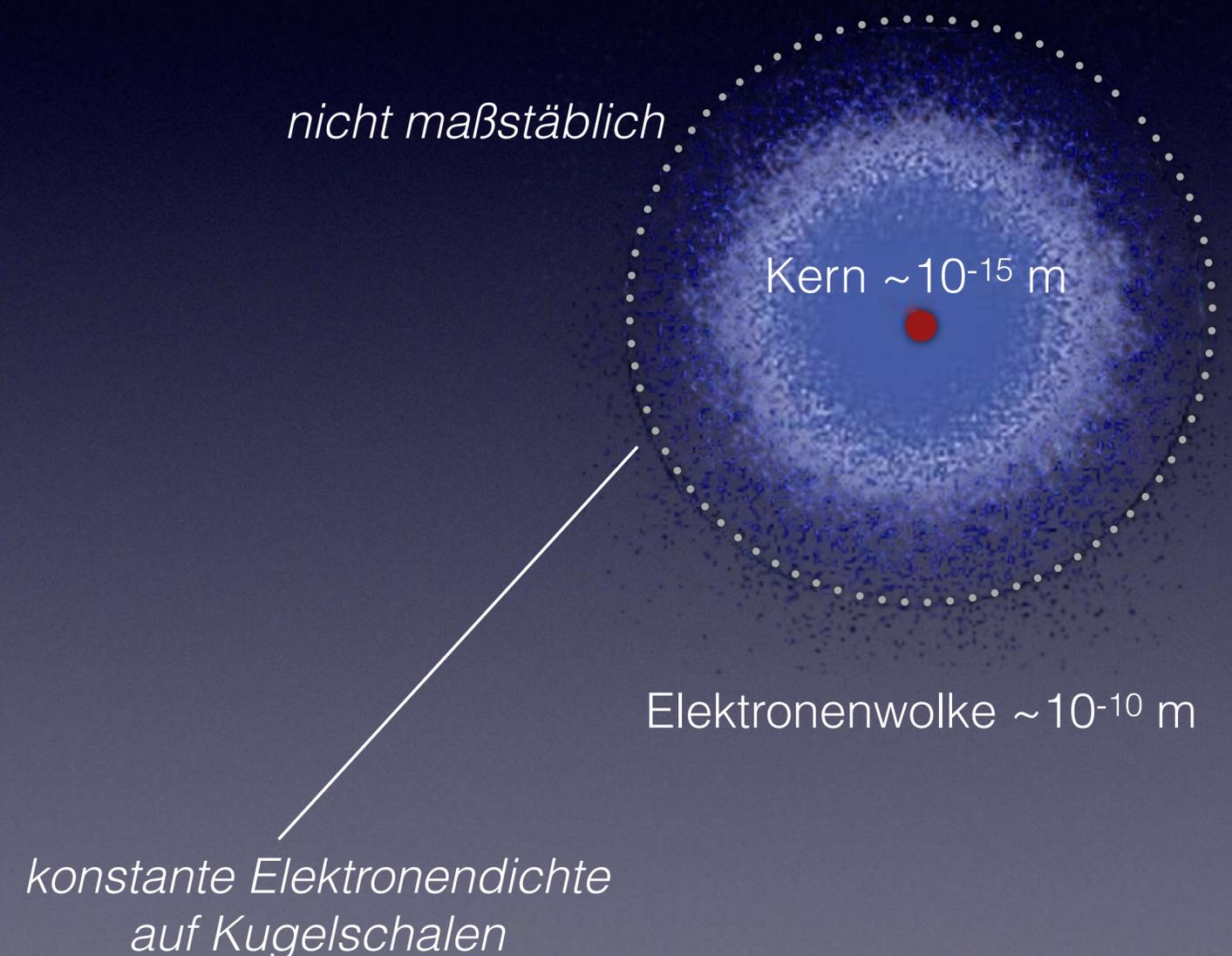
Die Nettoladung eines neutralen Objekts ist gleich Null, also sollte deine neutrale Hand kein elektrisches Feld erzeugen, das auf ein geladenes Klebeband einwirken könnte. Außerdem sollte deine neutrale Hand keine Kraft erfahren, die auf das elektrische Feld eines geladenen Klebebandes zurückzuführen ist. Nichts in unseren bisherigen Erklärungen zu den Eigenschaften elektrischer Wechselwirkungen erlaubt uns, diese Anziehung zu erklären!

Eine äußere Ladung kann eine Verschiebung der Position der Ladungen bewirken, aus denen ein neutrales Atom oder Molekül besteht. Um dies deutlich zu sehen, betrachten wir ein (einfaches) Wasserstoffatom.

Das leichte Elektron folgt nicht einer genau definierten Bahn um den schweren Kern, wie es die Erde um die Sonne tut. Vielmehr gibt es nur eine Wahrscheinlichkeit, das Elektron an einem bestimmten Ort zu finden.

Nebenstehende Darstellung zeigt diese Wahrscheinlichkeit grafisch. Du kannst dir das Bild als eine Art „Mehrfachbelichtung“ vorstellen.

Quantenmechanische Ansicht eines Wasserstoffatoms. Das Bild ist ein zweidimensionaler Schnitt durch eine dreidimensionale kugelförmige Verteilung. Jeder Punkt steht für die Position des Elektrons zum Zeitpunkt der „Mehrfachbelichtung“. Der winzige Kern ist der rote Punkt in der Mitte der Elektronenwolke. Durch die Bereiche mit konstanter Elektronendichte wird ein Kreis gezogen.



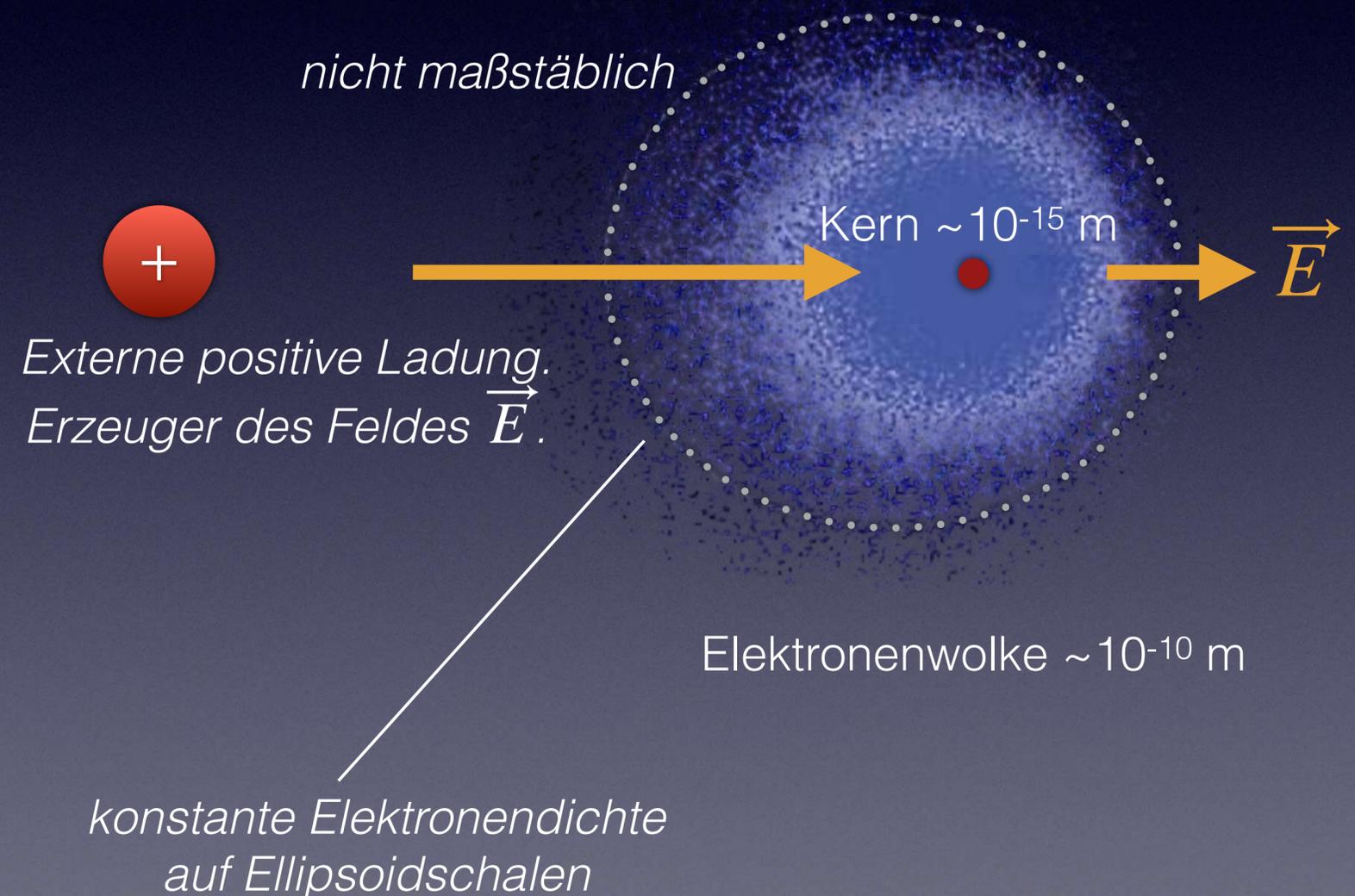
Kontrollpunkt 2

1. Ein cleverer Mensch fragt: „*Wenn der positive Atomkern in einer negativen Elektronenwolke verborgen ist, warum scheint dann nicht alle Materie negativ geladen zu sein?*“ Erkläre dem Fragenden den (Denk-) Fehler in seiner Argumentation.

Wenn die Elektronenwolke in einem Atom als kugelförmig gleichmäßig und immer auf den Kern zentriert betrachtet werden könnte, hätte ein neutrales Atom keine Wechselwirkung mit einer externen Ladung.

In einem Atom ist die Elektronenwolke jedoch nicht starr mit dem Kern verbunden. Die Elektronenwolke und der Kern können sich relativ zueinander bewegen. Wenn eine äußere Ladung in der Nähe ist, erzeugt sie ein elektrisches Feld, das Kräfte auf die Elektronenwolke und den Kern ausübt. Unter dem Einfluss dieses „angelegten“ elektrischen Feldes verschieben die Elektronenwolke und der Kern ihre Position relativ zueinander.

Eine positive Ladung erzeugt ein elektrisches Feld, das die Elektronenwolke des Wasserstoffatoms nach links (und den Wasserstoffkern nach rechts) verschiebt. Es wird eine Ellipse durch Regionen mit konstanter Elektronendichte gezeichnet. Es ist nun wahrscheinlicher, dass sich das Elektron links vom Kern befindet als rechts.

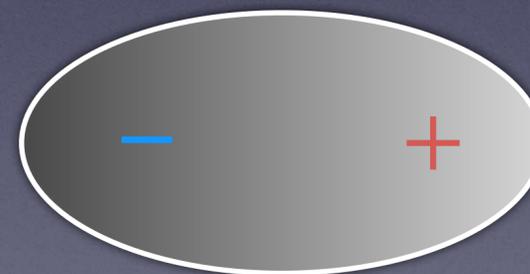


Die durchschnittliche Position des Elektrons befindet sich nun nicht mehr in der Mitte, wo sich der Kern befindet, sondern ist etwas nach links vom Kern verschoben.

Das **H**-Atom wird nicht sofort auseinandergerissen, weil die Anziehungskraft zwischen Kern und Elektron stärker ist als die Kraft, die von der entfernten äußeren Ladung ausgeübt wird. Wenn die äußere Ladung jedoch sehr nahe kommt, kann das **H**-Atom auseinanderbrechen oder mit der äußeren Ladung reagieren. Wäre die äußere Ladung ein Proton, könnte es sich mit dem Wasserstoffatom verbinden und ionisierten molekularen Wasserstoff H_2^+ bilden.

Ein Atom wird als „polarisiert“ bezeichnet, wenn seine Elektronenwolke durch den Einfluss einer äußeren Ladung so verschoben wurde, dass die Elektronenwolke nicht mehr auf den Kern zentriert ist (vorangehende Folie).

Für die meisten Zwecke können wir die Ladungsverteilung des polarisierten Atoms näherungsweise als eine kugelförmige negative Wolke betrachten, deren Zentrum vom positiven Kern entfernt ist. Eine gleichmäßige kugelförmige Ladungsverteilung verhält sich wie eine Punktladung, die sich im Zentrum der Kugel befindet, und zwar sowohl in dem Sinne, dass sie ein elektrisches Feld außerhalb der Kugel erzeugt, das mit dem elektrischen Feld einer Punktladung identisch ist, als auch, dass sie auf angelegte Felder so reagiert, als wäre sie eine Punktladung. Es ist daher sinnvoll, ein polarisiertes Atom als einen Dipol zu modellieren.



*vereinfachte
schematische Darstellung
eines atomaren Dipols*

Wir haben gesehen, dass ein polarisiertes Atom oder Molekül ein Dipol ist, da es zwei entgegengesetzte Ladungen gibt, die durch einen Abstand getrennt sind. Allerdings ist das polarisierte Atom oder Molekül kein permanenter Dipol. Wenn das angelegte elektrische Feld entfernt wird, verschiebt sich die Elektronenwolke wieder in ihre ursprüngliche Position, und es gibt keine Ladungstrennung mehr. Wir nennen das polarisierte Atom oder Molekül daher einen „induzierten“ Dipol.

Ein „induzierter Dipol“ entsteht also, wenn ein neutrales Objekt durch ein angelegtes elektrisches Feld polarisiert wird.

Ein „permanenter“ Dipol besteht aus zwei entgegengesetzten Ladungen, die durch einen festen Abstand voneinander getrennt sind, z. B. HCl oder H_2O .

Es wurde experimentell festgestellt, dass bei fast allen Materialien das Dipolmoment der polarisierten Atome oder Moleküle \vec{p}_{ind} direkt proportional zur Stärke des angelegten elektrischen Feldes \vec{E} ist. Es gilt der Zusammenhang

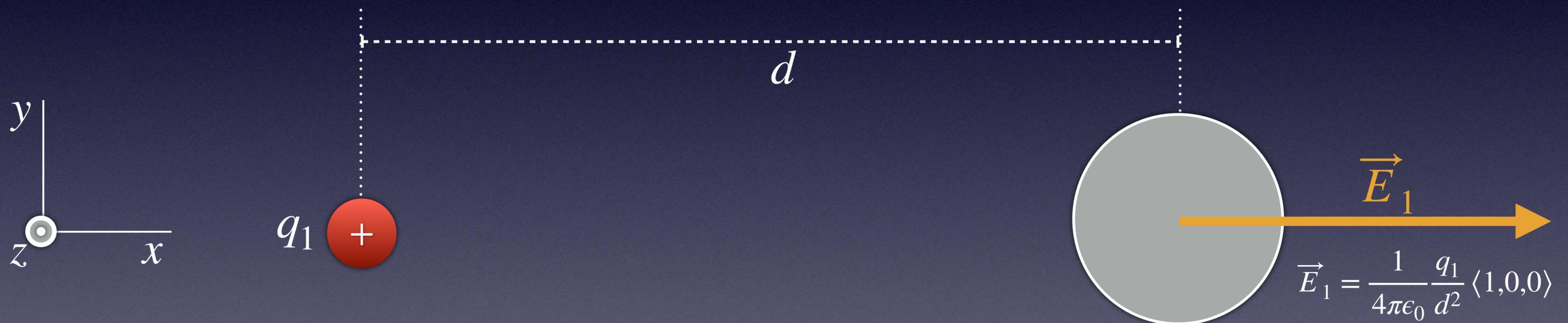
$$\vec{p}_{\text{ind}} = \alpha \vec{E} .$$

Die Konstante α wird als „Polarisierbarkeit“ eines bestimmten Materials bezeichnet. Die Polarisierbarkeit vieler Materialien wurde experimentell bestimmt, und Angaben dazu sind in verschiedenen Nachschlagewerken zu finden.

Kontrollpunkt 3

1. Die Polarisierbarkeit von Atomen beträgt typischerweise $\alpha \approx 1 \times 10^{-40} \text{ C}^2 \cdot \text{m/N}$. Es liegt ein sehr starkes äußeres Feld $|\vec{E}| = 3 \times 10^6 \text{ N/C}$ an. (1) Wie groß ist das induzierte Dipolmoment $|\vec{p}_{\text{ind}}|$? (2) Für $q = e$, wie groß ist die Ladungstrennung s ? Anmerkung: Ein solches Feld ist stark genug, um einen Funken in der Luft zu erzeugen.

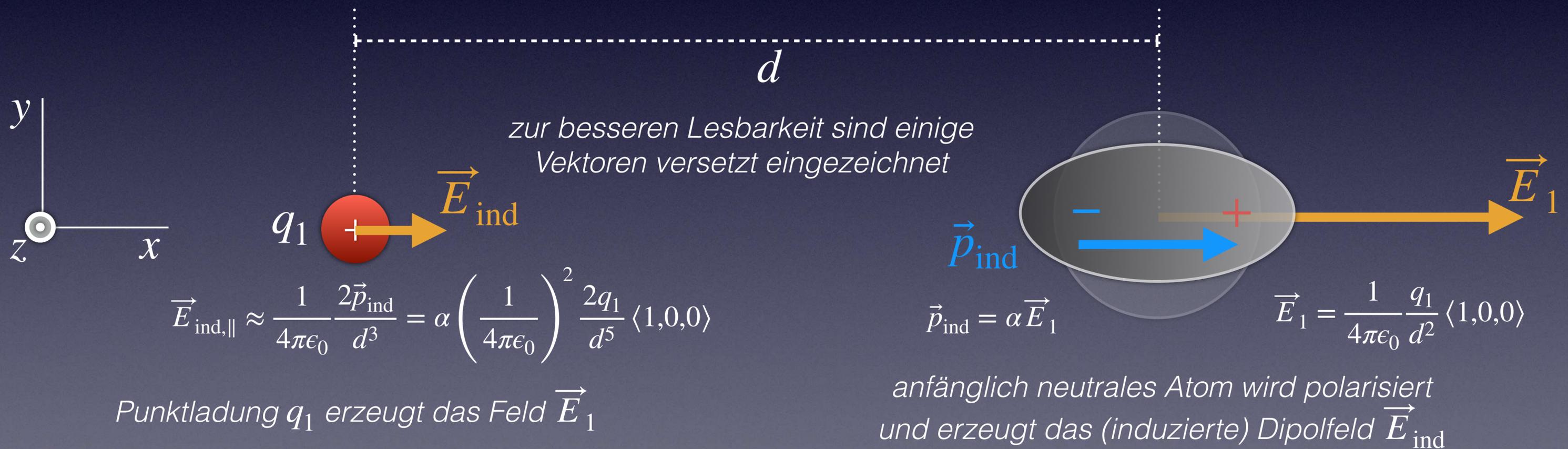
Wir sehen uns nun die Wechselwirkung zwischen einer positiven Punktladung und einem anfänglich neutralen Atom in mehreren Schritten genauer an. In der Natur läuft dieser Prozess sehr schnell, aber nicht instantan ab.



Punktladung q_1 erzeugt das Feld \vec{E}_1

anfänglich neutrales Atom

Das anfänglich neutrale Atom wird unter der Wirkung von \vec{E}_1 polarisiert und erhält ein (induziertes) Dipolmoment \vec{p}_{ind} , welches nun seinerseits das Feld \vec{E}_{ind} am Ort der Ladung q_1 erzeugt.



Bezeichnen wir mit \vec{r} den relativen Positionsvektor zwischen dem Ort einer Punktladung q_1 sowie dem Ort eines anfänglich neutralen Atoms, so erhalten wir für das induzierte Feld \vec{E}_{ind} am Ort der Punktladung

$$\vec{E}_{\text{ind}} \approx \alpha \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{2q_1}{|\vec{r}|^5} \hat{r} .$$

Die Kraft \vec{F}_{ind} auf die Punktladung q_1 ergibt sich zu

$$\vec{F}_{\text{ind}} \approx \alpha \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{2q_1^2}{|\vec{r}|^5} \hat{r} .$$

Wie auf der vorangehenden Folie dargestellt, können wir feststellen, dass die Kraft \vec{F}_{ind} , die das polarisierte Atom auf die Punktladung ausübt, proportional zu $1/|\vec{r}|^5$ ist und immer in Richtung \hat{r} , also zum polarisierten Atom hin, weist.

Wie groß ist die Kraft \vec{F}_1 , welche die Punktladung auf das polarisierte Atom ausübt? Aufgrund der Reziprozität der elektrischen Wechselwirkung erhalten wir

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_{\text{ind}} .$$

Kontrollpunkt 4

1. Wenn der Abstand zwischen einem neutralen Atom und einer Punktladung verdoppelt wird, um welchen Faktor ändert sich dann die Kraft, die die Punktladung auf das Atom ausübt?
2. Erkläre ausführlich, auch anhand von Grafiken, was passiert, wenn man ein negativ geladenes Klebeband in die Nähe seines Fingers bringt.
3. Nimm an, du hast ein negativ geladenes Klebeband. Nun reibst du einen Stift an einem Wollpullover und bringst ihn in die Nähe des Klebebandes. Falls das Klebeband in Richtung des Stifts ausgelenkt wird, ist der Bleistift dann positiv geladen?
4. Kann ein geladenes Objekt ein neutrales Objekt abstoßen?

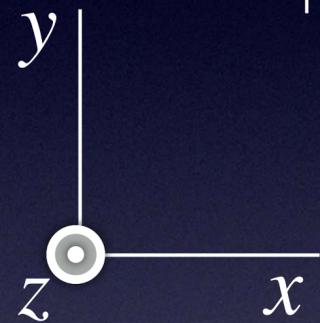
Es ist eine Tatsache, dass ein elektrisches Feld durch Materie hindurch wirkt und zugleich ein weiteres Beispiel für das Superpositionsprinzip. Es stimmt zwar, dass z.B. die Abstoßung zwischen zwei gleich geladenen Klebebändern schwächer ist, wenn ein Stück Papier dazwischen liegt, aber im Sinne des Prinzips ist diese Verringerung nicht darauf zurückzuführen, dass das Papier das Feld des anderen Bandes teilweise „blockiert“. Vielmehr ist das Nettofeld auf die Überlagerung von zwei Feldern zurückzuführen: das gleiche Feld, das man ohne das Papier gehabt hätte, und ein weiteres Feld, das durch die induzierten Dipole im Papier entsteht.

Aktuell können wir nicht beweisen, dass diese Ansicht richtig ist und dass es keine Blockierung des elektrischen Feldes gibt. Wir werden jedoch immer wieder feststellen, dass das Superpositionsprinzip für eine breite Palette von Phänomenen die richtigen Vorhersagen macht.

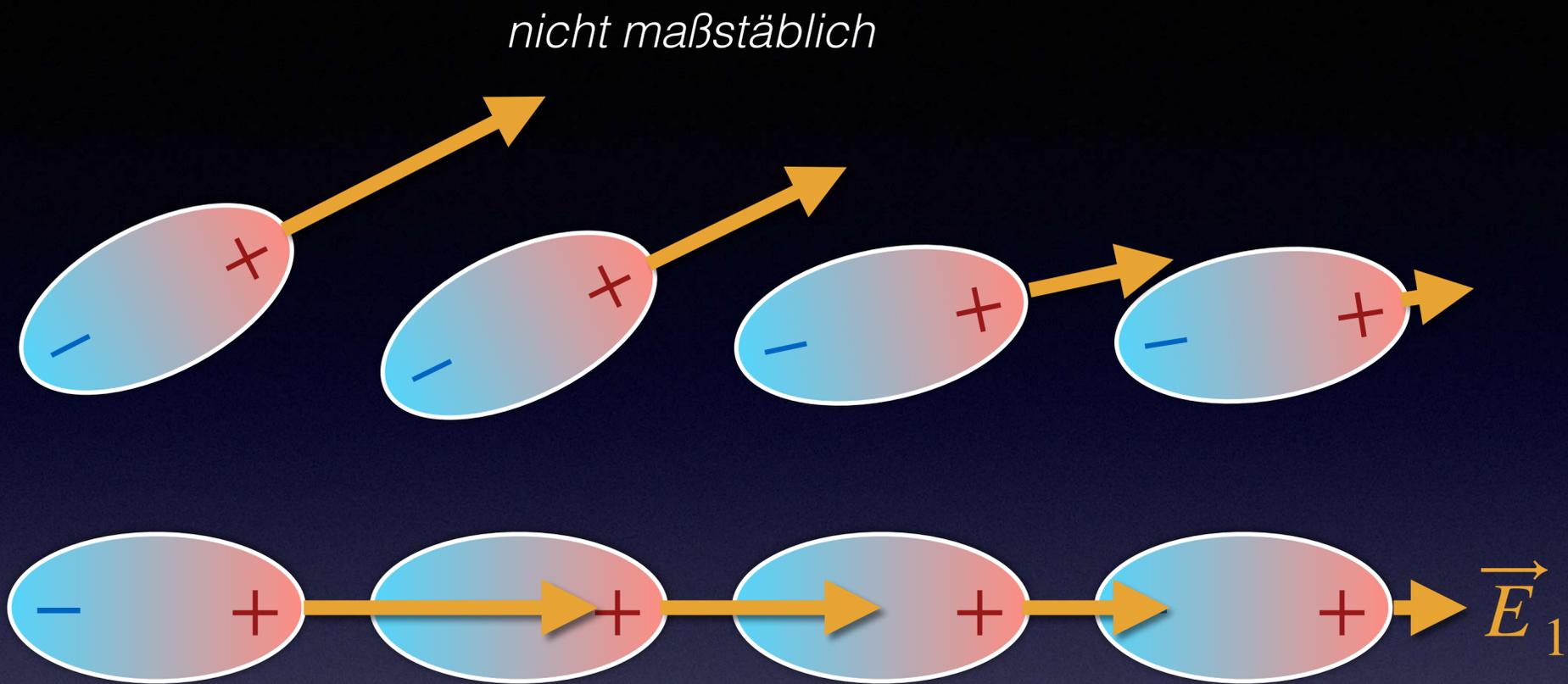
Polarisierung von (elektrischen) Isolatoren

In Isolatoren sind alle Elektronen fest an die Atome oder Moleküle gebunden, aus denen das Material besteht. Wir haben gesehen, dass ein einzelnes Atom oder Molekül durch ein angelegtes elektrisches Feld polarisiert werden kann, wodurch ein induzierter Dipol mit atomaren oder molekularen Abmessungen entsteht. Die Elektronen in einem Atom oder Molekül eines Isolators verschieben ihre Position geringfügig, bleiben aber an das Atom oder Molekül gebunden - die geladenen Teilchen können sich höchstens um einen Atomdurchmesser $d_a \approx 10^{-10} \text{ m}$ bewegen.

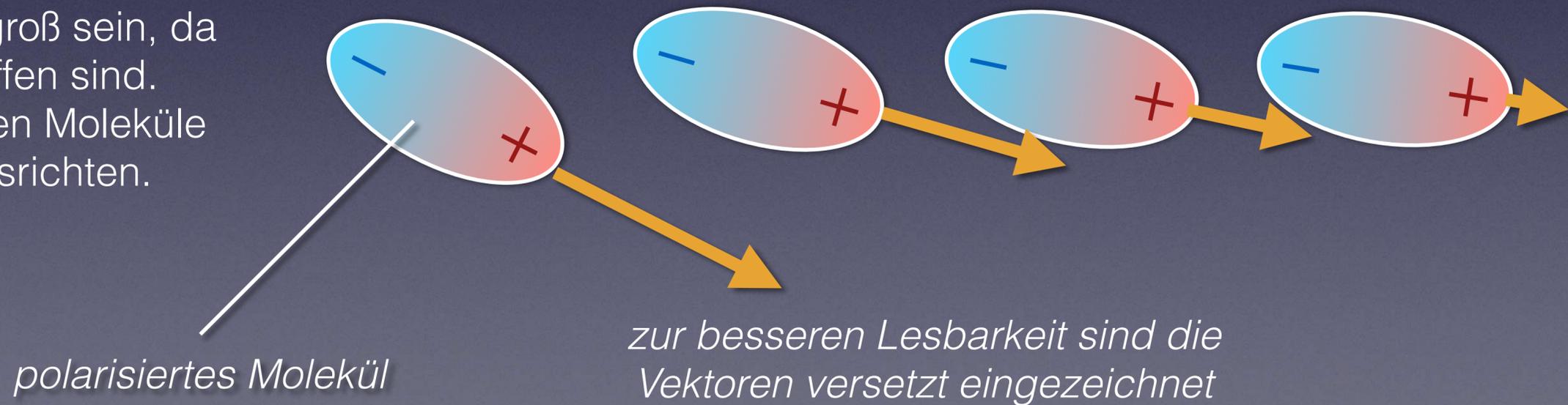
Hier ist ein fester Block aus isolierendem Material dargestellt, dessen Moleküle durch ein angelegtes elektrisches Feld der Punktladung q_1 polarisiert wurden (die Moleküle sind natürlich nicht maßstabsgetreu dargestellt). In jedem Molekül haben sich nur die Elektronen über eine sehr kurze Strecke bewegt, denn die Moleküle selbst können sich nicht frei bewegen.



q_1 



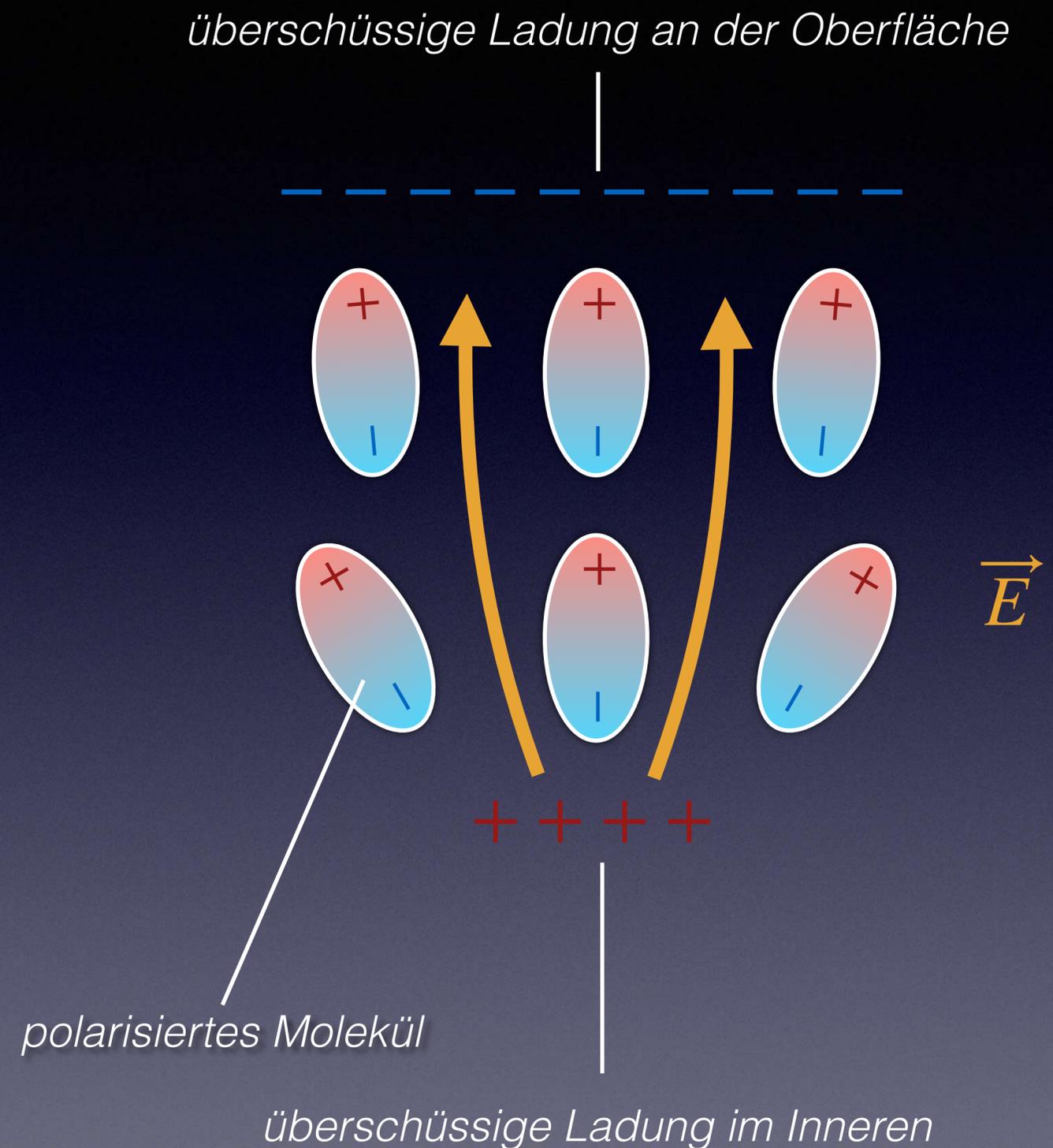
Der Nettoeffekt kann jedoch sehr groß sein, da viele Moleküle im Isolator betroffen sind. Beachte, dass sich die polarisierten Moleküle nach dem elektrischen Feld ausrichten.



Da die Elektronenwolke bei der Polarisierung eines Atoms oder Moleküls nur um eine winzige Strecke verschoben wird, läuft dieser Prozess sehr schnell ab ($< 1 \text{ ns}$).

In Grafiken von Isolatoren zeigen wir polarisierte Moleküle in übertriebener Größe, aber die Elektronen bleiben an das Molekül gebunden.

Da es in einem Isolator keine frei beweglichen geladenen Teilchen gibt, verbleiben überschüssige Ladungen dort, wo sie sind.

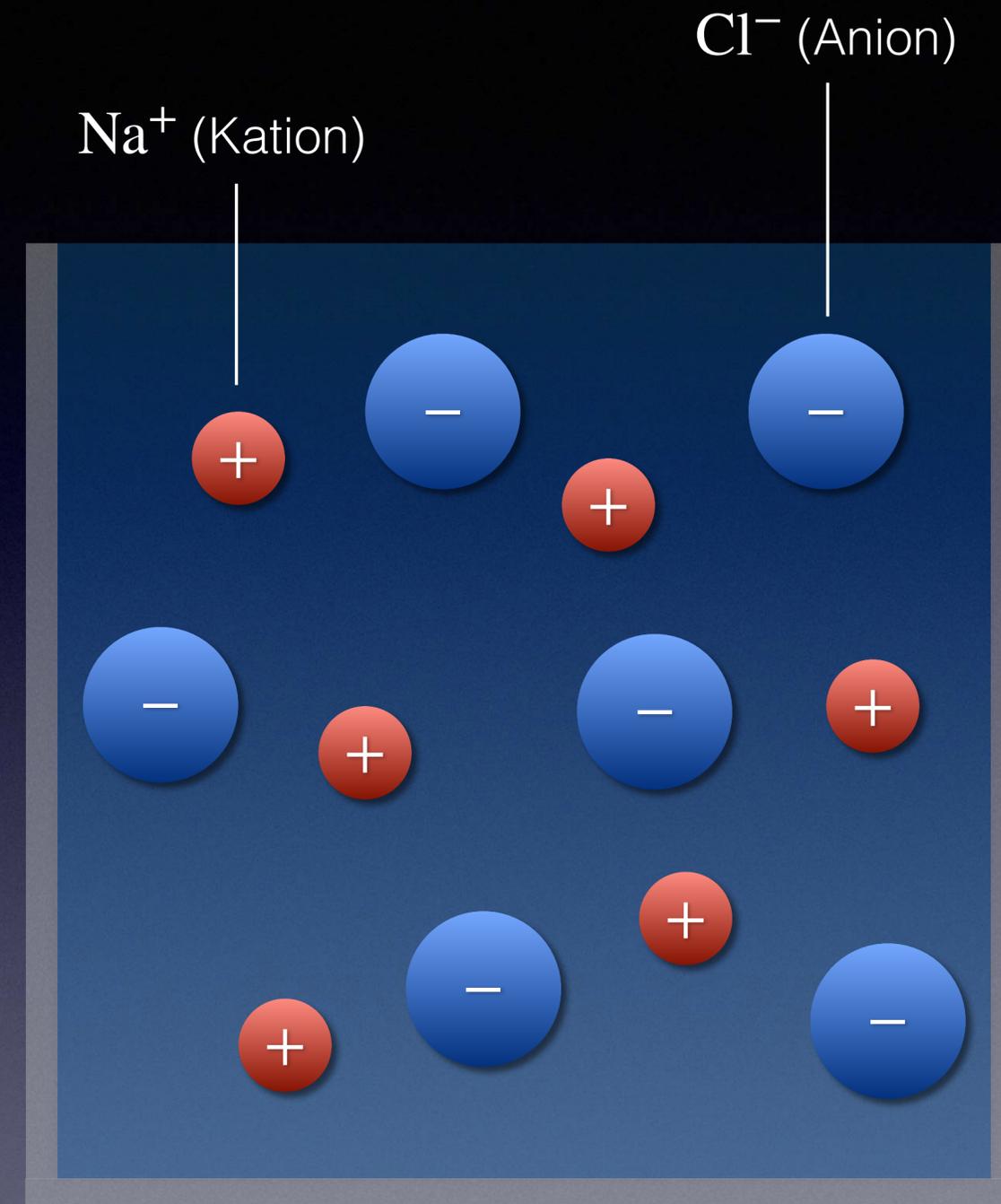


Wenn sich Atome oder Moleküle in einem Isolator als Reaktion auf ein von externen geladenen Objekten erzeugtes, einwirkendes elektrisches Feld \vec{E}_{app} polarisieren, erzeugen die polarisierten Moleküle selbst elektrische Felder \vec{E}_{pol} , die auf benachbarte Moleküle einwirken. Da die Wirkung der polarisierten Moleküle aufeinander in der Regel gering ist, verglichen mit der Wirkung des ursprünglich angelegten Feldes, wird dies bei der Erörterung von polarisierten Isolatoren vernachlässigt. Dipolmoment:

$$\vec{p} = \alpha \left(\vec{E}_{\text{app}} + \vec{E}_{\text{pol}} \right) \approx \alpha \vec{E}_{\text{app}} .$$

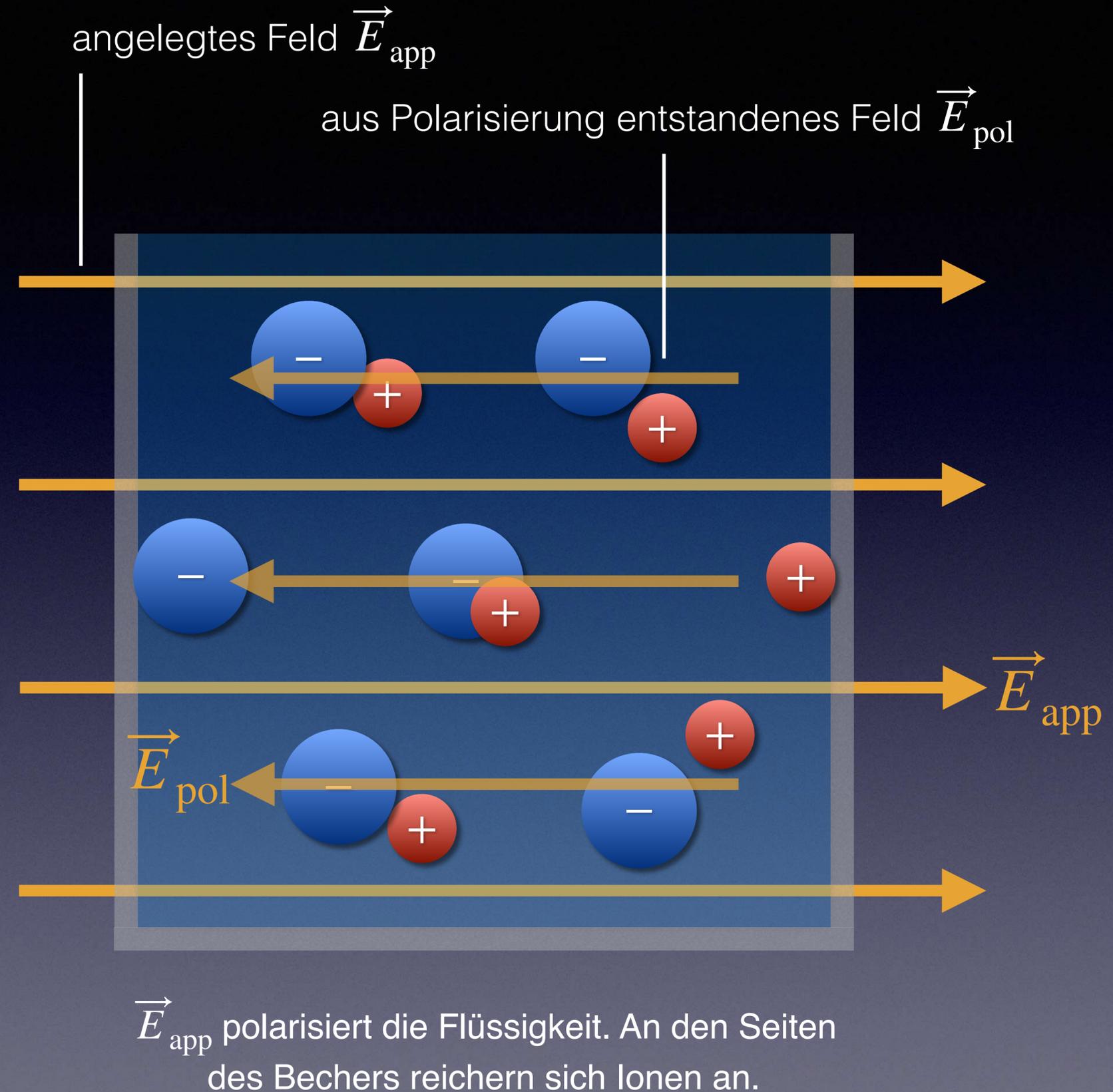
Polarisierung von (elektrischen) Leitern

Ionische Flüssigkeiten sind leitfähig, wie z. B. eine Lösung von Natriumchlorid **NaCl** (Kochsalz) in Wasser **H₂O**. In Salzwasser sind die beweglichen geladenen Teilchen **Na⁺** (Kationen) und **Cl⁻** (Anionen). Zusätzlich gibt es darin gibt auch sehr geringe Konzentrationen von **H⁺**- und **OH⁻**-Ionen, die in der nebenstehenden Grafik nicht dargestellt sind.



Ein Becher, gefüllt mit einer ionischen Flüssigkeit, hier Salzwasser.

Wenn ein elektrisches Feld \vec{E}_{app} an einen Leiter angelegt wird, beginnen sich die beweglichen geladenen Teilchen in Richtung der Kraft zu bewegen, die das Feld auf sie ausübt. Während sich die Ladungen bewegen, beginnen sie jedoch, sich lokal anzureichern, wodurch eine Ladungskonzentration entsteht, die ihrerseits ein elektrisches Feld in dem Bereich erzeugt, der von den verbleibenden mobilen Ladungen eingenommen wird. Das elektrische Nettopfeld in diesem Bereich ist die Überlagerung des angelegten (externen) Feldes \vec{E}_{app} und des elektrischen Feldes \vec{E}_{pol} , das durch die verschobenen Ladungen im Material erzeugt wird. Die Ionen (geladene Atome oder Moleküle) befinden sich in ständiger Bewegung, so dass die tatsächliche Situation dynamisch ist.



Wenn ein Becher mit Salzwasser in einem Bereich platziert wird, in dem ein angelegtes elektrisches Feld vorhanden ist, erfährt ein Natrium- oder Chlorid-Ion eine elektrische Kraft und beginnt, sich in Richtung der Kraft zu bewegen. Aber selbst wenn die Kraft konstant bleibt, wird das Ion nicht immer weiter beschleunigt, weil es mit Wassermolekülen oder anderen Ionen zusammenstößt. Auf der mikroskopischen Ebene gibt es also eine Art „Reibung“.

Damit sich die Ionen mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, muss ein konstantes elektrisches Feld an die Lösung angelegt werden. Die Geschwindigkeit, mit der sich mobile Ladungen im Mittel durch einen Leiter bewegen, wird als **Driftgeschwindigkeit** \vec{v}_{drift} (en: *drift velocity*) bezeichnet. Die Driftgeschwindigkeit ist direkt proportional zum elektrischen (Netto-) Feld \vec{E}_{net} am Ort der Ladung. Die Proportionalitätskonstante wird als **Ladungsträgerbeweglichkeit** b (en: *mobility*) bezeichnet:

$$\vec{v}_{\text{drift}} = b \vec{E}_{\text{net}} .$$

Kontrollpunkt 5

1. An eine ionisierte Flüssigkeit, die Chlorid-Ionen enthält, wird ein elektrisches Feld $\left| \vec{E}_{\text{app}} \right| = 190 \text{ N/C}$ angelegt. Die Beweglichkeit der Chlorid-Ionen in der Lösung beträgt $b = 7.91 \times 10^{-8} \text{ (m} \cdot \text{C)/(\text{N} \cdot \text{s})}$. Wie hoch ist die durchschnittliche Driftgeschwindigkeit der Ionen?

Im Gleichgewichtszustand verschwindet die Driftgeschwindigkeit, also

$$\vec{v}_{\text{drift}} = \vec{0}$$

da

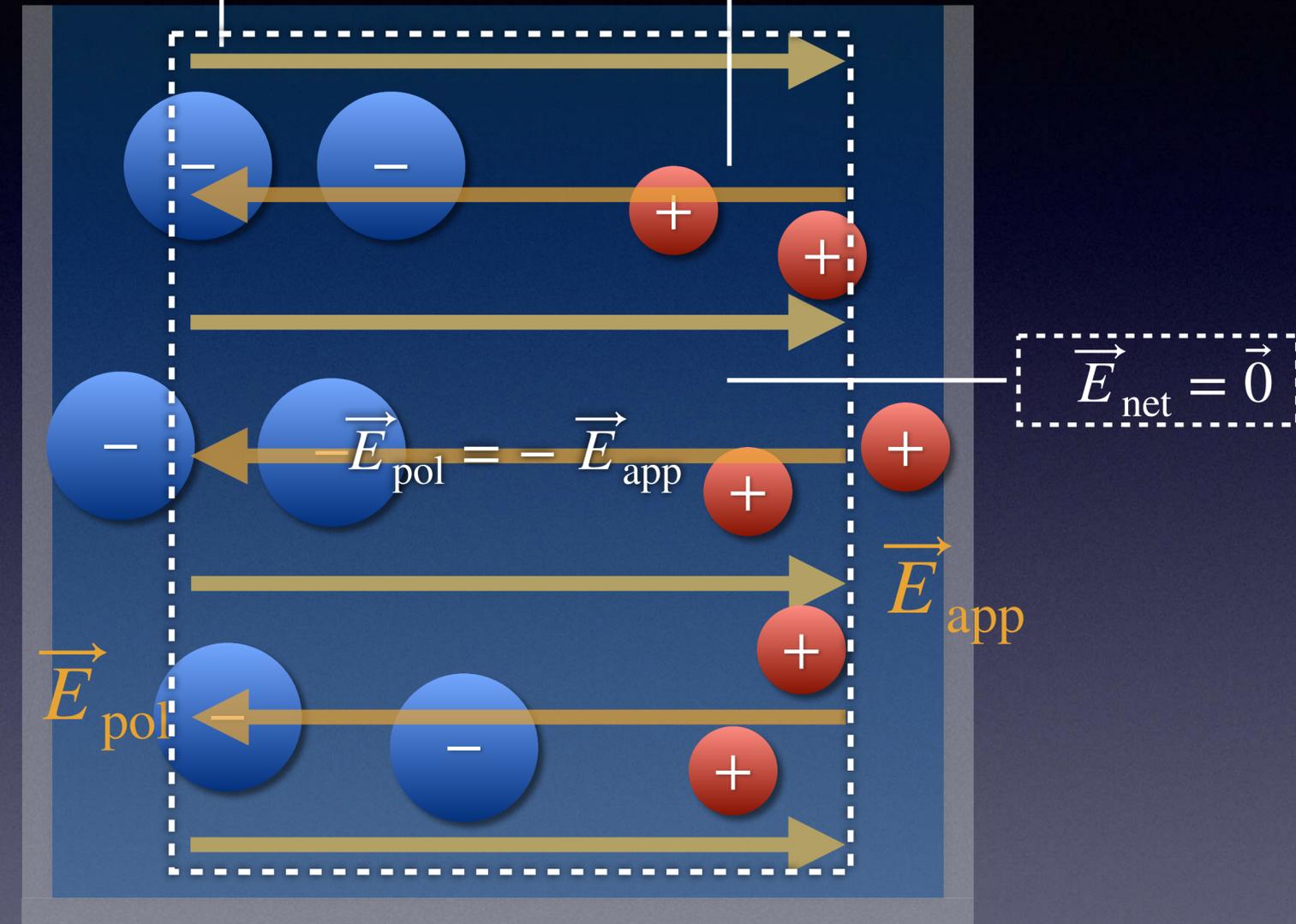
$$\vec{E}_{\text{pol}} = -\vec{E}_{\text{app}}$$

gilt, und damit

$$\vec{E}_{\text{net}} = \vec{E}_{\text{pol}} + \vec{E}_{\text{app}} = \vec{0}$$

wird. Das elektrische Feld im Inneren der Flüssigkeit ist also Null, und zwar nicht aufgrund einer „Blockierung“ von Feldern, sondern aufgrund der Überlagerung zweier Effekte: der Wirkung der externen Ladungen und der Wirkung der Polarisationsladungen (Superpositionsprinzip).

angelegtes Feld \vec{E}_{app}
aus Polarisierung entstandenes Feld \vec{E}_{pol}

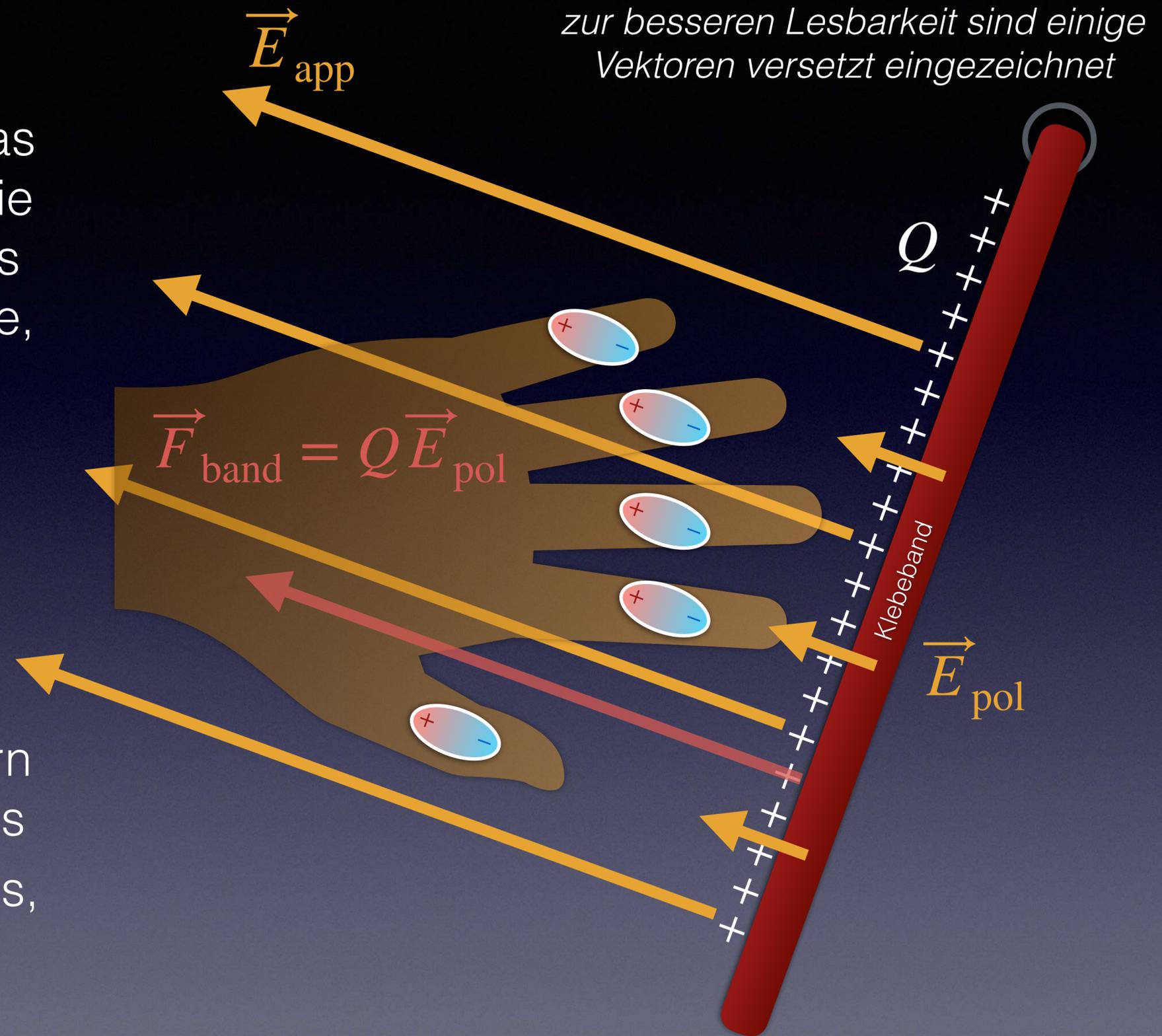


\vec{E}_{app} polarisiert die Flüssigkeit. \vec{E}_{pol} ist das durch Polarisierung entstandene Feld.

Dein eigener Körper besteht hauptsächlich aus Salzwasser, auch das Blut und das Innere der Zellen sowie die diversen Flüssigkeiten. Ein elektrisches Feld polarisiert daher einzelne Moleküle, z.B. in deinen Fingern.

Das positiv geladene Klebeband erzeugt ein elektrisches Feld \vec{E}_{app} .

Dadurch werden Moleküle und Flüssigkeiten deiner Hand polarisiert. Die induzierten Dipole in deinen Fingern erzeugen nun ihrerseits ein elektrisches Feld \vec{E}_{pol} an der Stelle des Klebebands, welches dazu führt, dass das Band angezogen wird (Kraft \vec{F}_{band}).

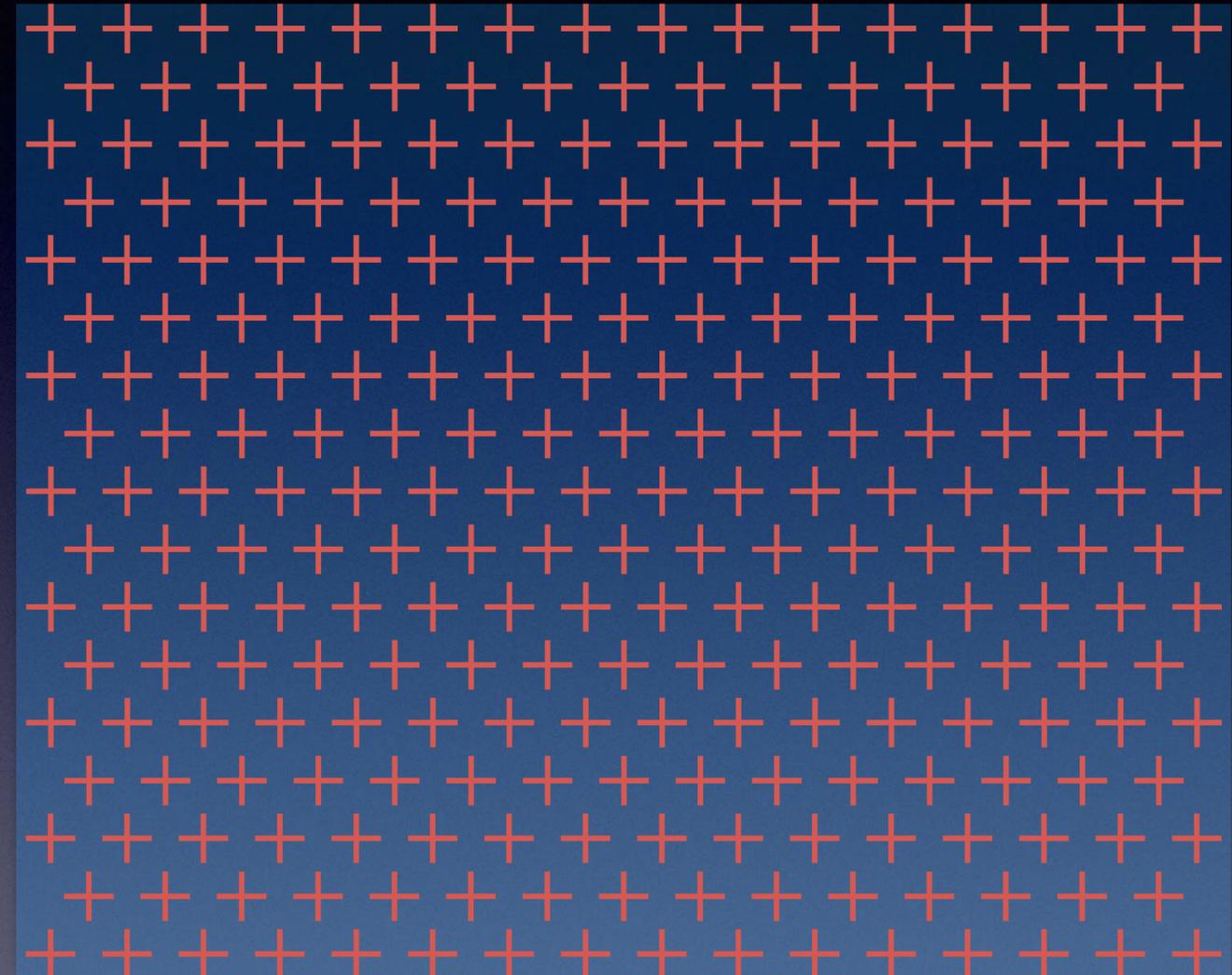


Ladungsbewegung in Metallen

Die Atome in festem Metall sind in einer regelmäßigen geometrischen 3D-Anordnung angeordnet, die als „Gitter“ bezeichnet wird.

Die inneren Elektronen eines jeden Metallatoms sind an den Kern gebunden.

Einige der Außenelektronen sind an chemischen Bindungen zwischen den Atomen beteiligt (die „Federn“ in dem Kugel-Feder-Modell eines Festkörpers). Einige der Außenelektronen (in der Regel ein Elektron pro Atom) gehören jedoch zu einem „Meer“ von beweglichen Elektronen, die sich im gesamten makroskopischen Stück eines festen Metalls frei bewegen können. Die Elektronen sind nicht völlig frei; sie sind an das Metall als Ganzes gebunden und lassen sich nur schwer aus dem Metall entfernen. Metalle sind aufgrund dieser beweglichen Elektronen ausgezeichnete Leiter.



2D-Schnitt durch nicht polarisiertes Metall: einheitliches „Meer“ aus beweglichen Elektronen (blau), positive Atomkerne („+“-Symbole).

Obwohl sich die frei beweglichen Elektronen gegenseitig stark abstoßen, wird diese Abstoßung zwischen den Elektronen im Durchschnitt durch die Anziehungskraft der positiven Atomkerne neutralisiert (hier ist ein „Kern“ ein neutrales Atom abzüglich seines frei beweglichen Elektrons, hat also eine Ladung von $+e$). Dies hat zur Folge, dass das elektrische Feld in einem im Gleichgewicht befindlichen Metallstück im Mittel Null ist.

Aus diesem Grund sehen die beweglichen Elektronen in gewisser Weise wie ein ideales Gas aus: Sie bewegen sich in einem Bereich, der frei vom elektrischen Feld ist, so dass sie weder untereinander noch mit den Atomkernen in Wechselwirkung zu treten scheinen. In der Tat wird in einigen einfachen Modellen das „Meer“ der beweglichen Elektronen als ideales Gas („Elektronengas“) behandelt.

Ein einfaches klassisches Modell der Elektronenbewegung wird nach dem Physiker Paul Drude (1863 - 1906) „**Drude-Modell**“ genannt: Ein bewegliches Elektron im Metall wird unter dem Einfluss des elektrischen Feldes im Inneren des Metalls beschleunigt und gewinnt Energie, aber dann verliert es diese Energie, indem es mit dem Gitter der Atomkerne zusammenstößt, das aufgrund seiner eigenen Wärmeenergie vibriert und durch die Zusammenstöße der Elektronen mit dem Gitter weitere Wärmeenergie gewinnt. Nach einem Zusammenstoß wird ein Elektron erneut beschleunigt und stößt erneut zusammen. Dieser Vorgang führt zu einer **Start-Stop-Bewegung** des einzelnen Elektrons.

Die durchschnittliche Geschwindigkeit eines Elektrons bei dieser Start-Stop-Bewegung wird als „**Driftgeschwindigkeit**“ bezeichnet und wir sagen, dass das Elektron durch das Metall „driftet“. In Wirklichkeit wird die langsame Driftbewegung von der stochastischen Bewegung mit hoher Geschwindigkeit der Elektronen in alle Richtungen innerhalb des Metalls überlagert. Eine vollständige Behandlung von Elektronen in einem Metall, einschließlich der Gründe für die stochastische Bewegung in alle Richtungen, erfordert Quantenmechanik, aber das einfache Drude-Modell ermöglicht es uns, die meisten wichtigen Aspekte des Stromflusses auf mikroskopischer Ebene zu verstehen.

Mit Hilfe des Prinzips Impuls können wir schreiben:

$$\Delta \vec{p} = \vec{F}_{\text{net}} \Delta t = -e \vec{E}_{\text{net}} \Delta t .$$

Darin bezeichnet Δt die Zeit zwischen zwei Kollisionen. Unter der Annahme, dass ein Elektron bei einer Kollision seinen gesamten Impuls verliert, erhalten wir

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_f - \vec{p}_i \approx \vec{p}_f - \vec{0} = -e \vec{E}_{\text{net}} \Delta t .$$

Mit der mittleren Zeitspanne $\overline{\Delta t}$ zwischen zwei Kollisionen folgt

$$\vec{p}_f \approx -e \vec{E}_{\text{net}} \overline{\Delta t} .$$

Für kleine Geschwindigkeiten können wir schreiben

$$\overline{\vec{p}}_f \approx m_e \vec{v}_{\text{drift}} \approx -e \vec{E}_{\text{net}} \overline{\Delta t} ,$$

und damit erhalten wir für die Driftgeschwindigkeit der Elektronen

$$\vec{v}_{\text{drift}} = -\frac{e}{m_e} \vec{E}_{\text{net}} \overline{\Delta t} .$$

Die Driftgeschwindigkeit nimmt somit proportional zur elektrischen Feldstärke zu, solange sich die Temperatur des Metalls nur unwesentlich ändert.

Durch Vergleich mit dem Zusammenhang zwischen Driftgeschwindigkeit und Ladungsträgerbeweglichkeit b erhalten wir

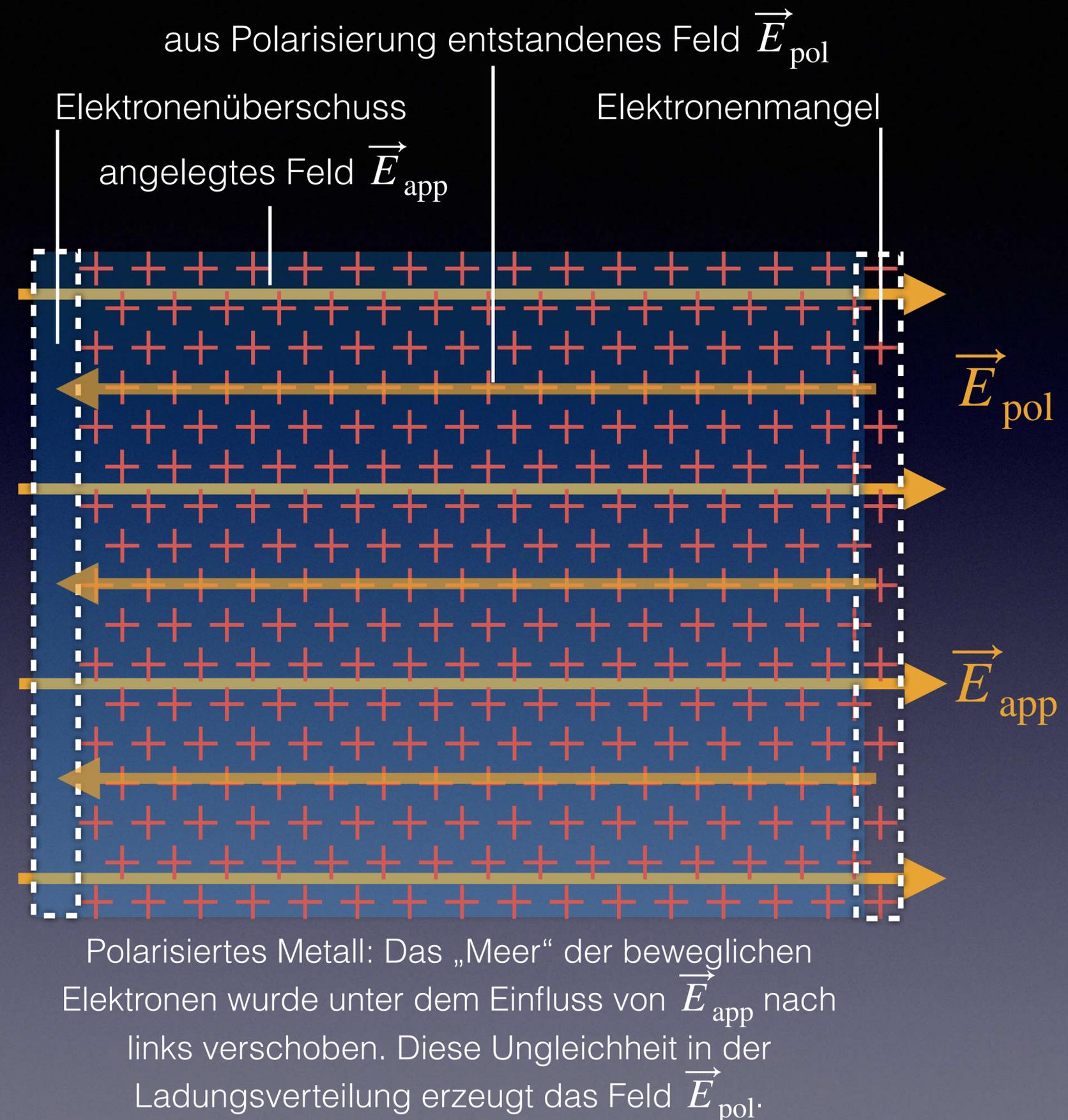
$$b = \frac{e}{m_e} \overline{\Delta t} .$$

Verschiedene Metalle haben unterschiedliche Beweglichkeiten der Ladungsträger. Je höher die Beweglichkeit ist, desto höher ist die Driftgeschwindigkeit bei einer bestimmten elektrischen Feldstärke.

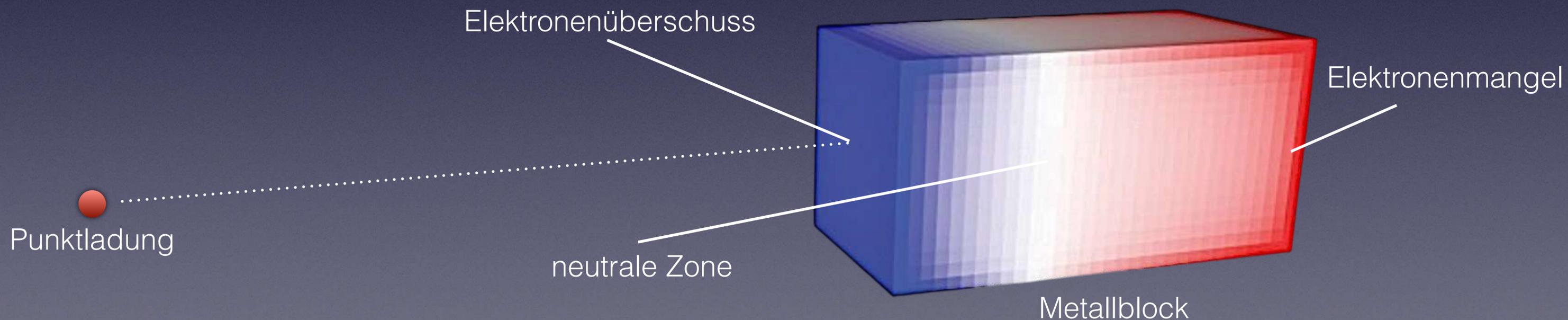
Kontrollpunkt 6

1. Die Beweglichkeit von Elektronen in Kupfer beträgt $4.5 \times 10^{-3} \text{ (m} \cdot \text{C)/(\text{N} \cdot \text{s})}$. Wie groß müsste ein elektrisches Feld \vec{E}_{net} sein, damit die beweglichen Elektronen in einem Kupferblock eine Driftgeschwindigkeit von $1 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ erreichen?

Wenn an ein Metall ein elektrisches Feld angelegt wird, polarisiert das Metall. Wir können die Polarisation eines Metalls als Verschiebung des gesamten „Meers“ an beweglichen Elektronen relativ zu den festen positiven Kernen beschreiben. In der nebenstehenden Grafik haben sich die Elektronen auf der linken Seite angehäuft. Auf der rechten Seite herrscht ein entsprechender Mangel an Elektronen. Die Verschiebung ist extrem klein, viel kleiner als ein Atomdurchmesser! Es ist nicht notwendig, dass die Elektronen von einem Ende des Blocks zum anderen wandern. Es genügt, das gesamte „Meer“ ein wenig zu verschieben. Deshalb findet diese Verschiebung in sehr kurzer Zeit statt, in weniger als einer Nanosekunde.



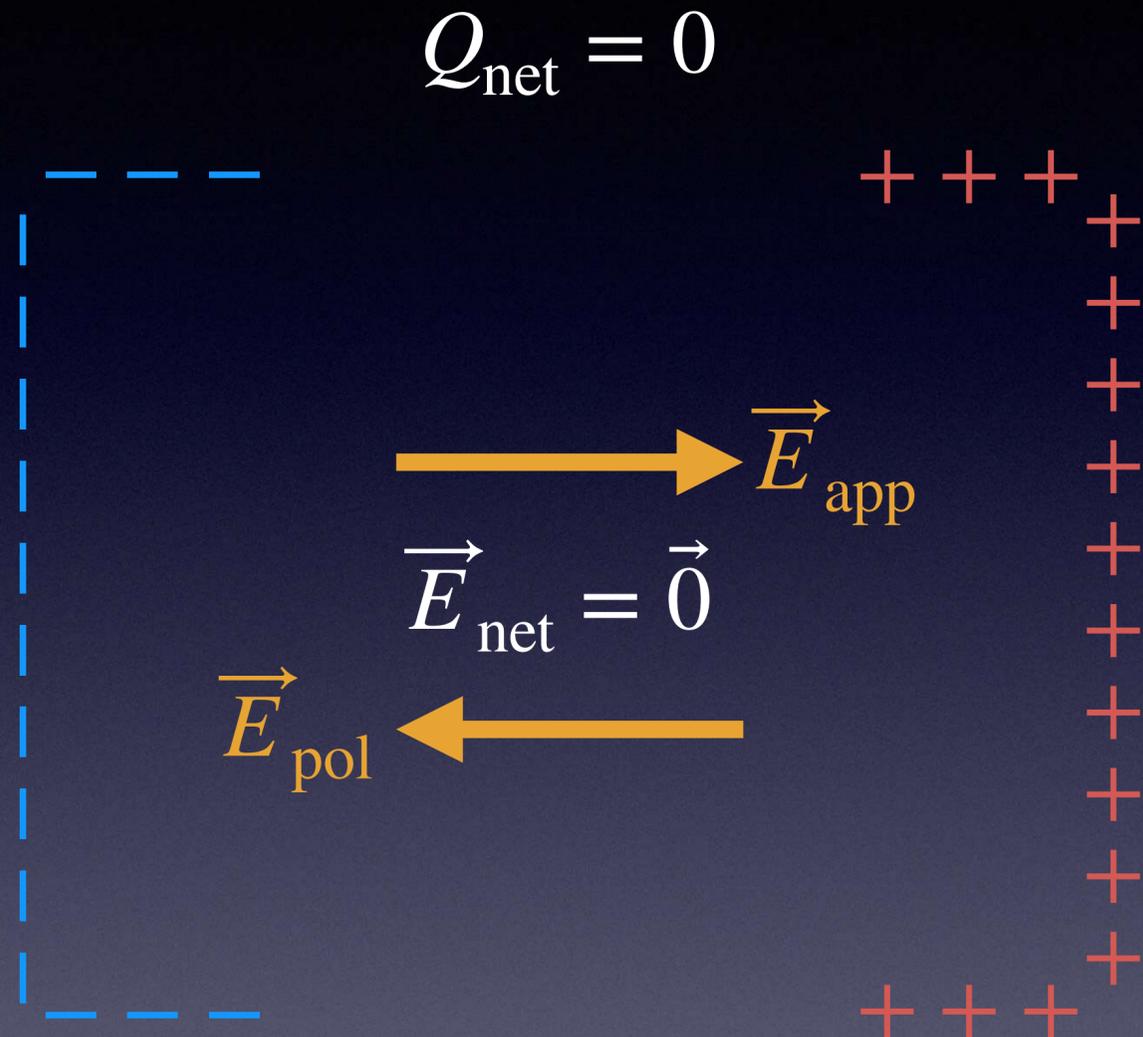
Die Grafik zeigt die Polarisierung eines neutralen Metallblocks, die durch eine positive Punktladung links vom Block verursacht wird (Ergebnis einer numerischen Simulation). Der Block ist immer noch neutral, aber die negative Ladung hat sich auf der Oberfläche der linken Seite des Blocks angesammelt, während die positive Ladung auf der rechten Seite des Blocks zurückbleibt. Die überschüssige Ladung konzentriert sich tendenziell an den Kanten und Ecken des Blocks. Die Ladung auf der Oberfläche des Blocks ist dort dichter, wo das polarisierende Feld größer ist.



Nebenstehend wird ein polarisiertes Metall auf eine vereinfachte Art und Weise dargestellt:

- $-$ und $+$ -Zeichen außerhalb der Oberflächen zeigen an, welche Oberflächen dünne Schichten negativer oder positiver Ladung aufweisen, die auf Verschiebungen im „Meer“ der beweglichen Elektronen zurückzuführen sind. Die Zeichen „sitzen“ direkt außerhalb der Oberfläche eines Metallgegenstandes.
- Die positiven Atomkerne und das bewegliche „Meer“ aus Elektronen im Inneren des Metalls werden nicht dargestellt, da das gesamte Innere neutral ist.

Das Diagramm ist damit viel einfacher zu interpretieren, wenn wir die neutralen Bereiche nicht mit Ladungen überladen, die gezählt werden müssen, um zu sehen, ob sie sich insgesamt ausgleichen oder nicht.



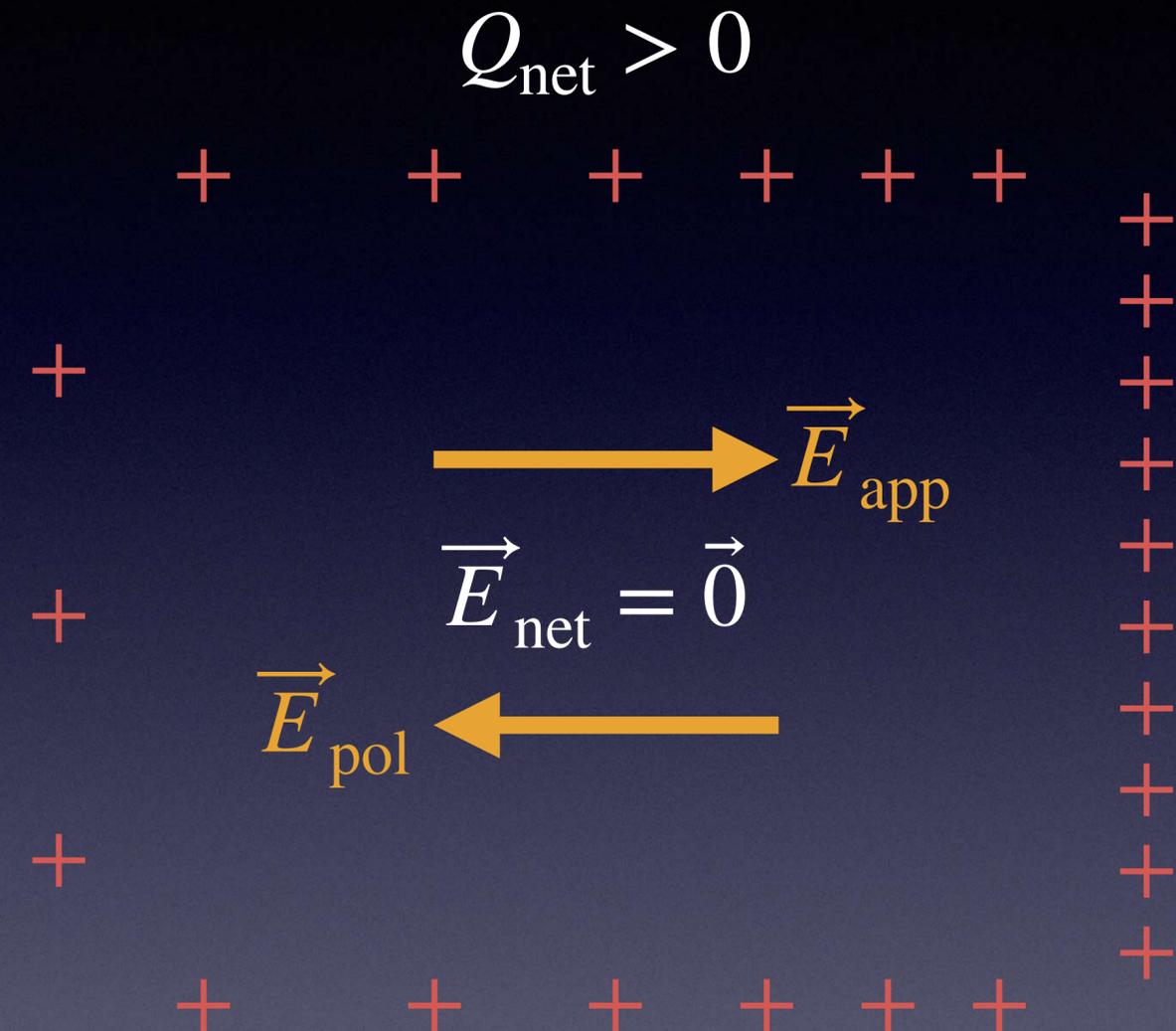
Eine einfachere Art, die Polarisation eines polarisierten Metalls darzustellen.

Achte auf eine präzise Verwendung von Fachbegriffen. Der auf der vorangehenden Folie gezeigte Metallblock ist polarisiert. Er ist nicht geladen; seine Nettoladung ist immer noch Null.

Ein Objekt, zum Beispiel ein Metallblock, wird dann als geladen bezeichnet, wenn seine Nettoladung ungleich Null ist

Andererseits kann ein geladenes Objekt zusätzlich auch polarisiert sein. Der nebenstehend schematisch dargestellte, positiv geladene Metallblock ist ebenfalls polarisiert.

„Polarisiert“ und „geladen“ sind also keine Synonyme!



Dieser Metallblock ist sowohl geladen als auch polarisiert.

Es ist einigermaßen faszinierend, dass sich bewegliche Ladungen so anordnen, dass das elektrische Nettfeld nicht nur an einem einzigen Ort, sondern an jedem Ort im Inneren des Metalls gleich Null ist.

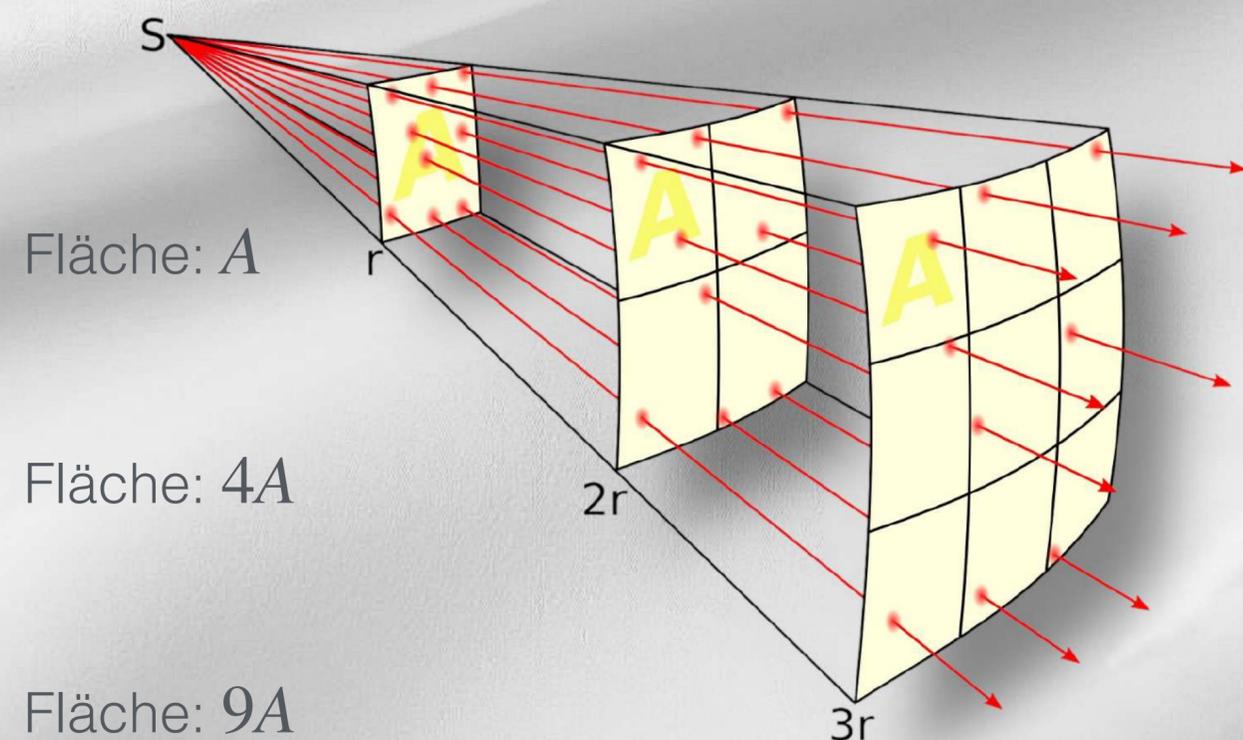
Es wäre für uns ein sehr schwieriges Problem, genau zu berechnen, wo geladene Teilchen platziert werden müssen, um ein Nettfeld von Null in einem Metallobjekt zu erzeugen, aber tatsächlich ordnen sich die vielen beweglichen Ladungen so an, dass dieser Zustand eintritt.

Es lässt sich zeigen, dass dies aufgrund der $1/|\vec{r}|^2$ -Abhängigkeit (en: *inverse square law*) des elektrischen Feldes vom Abstand möglich ist - wäre der Exponent nicht genau 2, sähe die Welt ziemlich anders aus.

Exkurs: In der Wissenschaft ist eine $1/|\vec{r}|^2$ Abhängigkeit jedes (natur-) wissenschaftliche Gesetz, das besagt, dass die beobachtete „Intensität“ einer bestimmten physikalischen Größe umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung von der Quelle dieser physikalischen Größe ist. Die grundlegende Ursache hierfür kann als „geometrische Verdünnung“ verstanden werden, die der Strahlung einer Punktquelle in den dreidimensionalen Raum entspricht.

Da die Oberfläche einer Kugel $4\pi R^2$ proportional zum Quadrat des Radius R ist, verteilt sich die Strahlung mit zunehmender Entfernung von der Quelle auf eine Fläche, die proportional zum Quadrat der Entfernung von der Quelle wächst.

S steht für die Lichtquelle. Die Linien stellen den von dieser Quelle ausgehenden Fluss dar. Die Gesamtzahl der Flusslinien hängt von der Stärke der Lichtquelle ab und ist, unabhängig von der Entfernung, konstant.

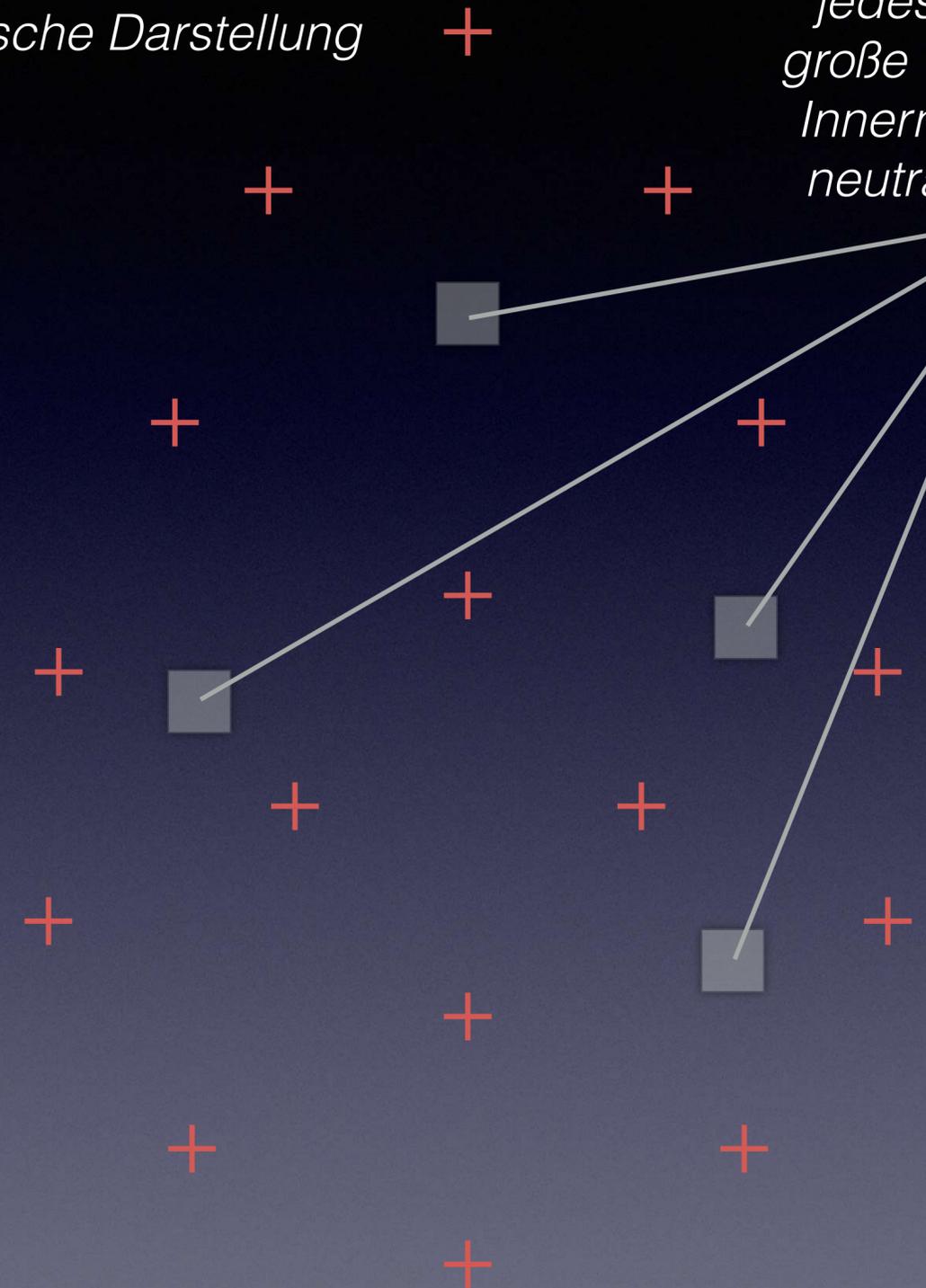


Die Dichte der Flusslinien ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung von der Quelle. Daher ist die Feldstärke umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands von der Quelle.

Bitte verallgemeinere eine unserer bisherigen Schlussfolgerungen nicht zu sehr. Es stimmt nicht, dass das elektrische Nettofeld in einem Metall immer gleich Null ist. Während das Metall polarisiert wird, befindet es sich nicht im Gleichgewicht, und im Inneren des Metalls herrscht ein elektrisches Feld ungleich Null, das eine Kraft auf die Elektronen im „Meer“ ausübt. In einem Stromkreis verhindert die Batterie, dass das System ein Gleichgewicht erreicht. In einer solchen Nicht-Gleichgewichtssituation kann es ein elektrisches Feld im Inneren des Metalls geben und damit eine Kraft, die kontinuierlich auf die Elektronen wirkt, was zu einer kontinuierlichen Verschiebung der Elektronen im geschlossenen Kreislauf führt und einen elektrischen Strom erzeugt.

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Metallen (und der $1/|\vec{r}|^2$ -Eigenschaft der elektrischen Wechselwirkung, wie wir später noch sehen werden) ist, dass überschüssige Ladungen auf einem Stück Metall oder einem Leiter immer auf einer äußeren oder inneren Oberfläche zu finden sind. Dies macht intuitiv Sinn, da sich überschüssige Ladungen gegenseitig abstoßen und so weit wie möglich voneinander entfernt sind. Jeder Bereich mit mehreren Atomen im Inneren des Leiters hat dagegen eine Nettoladung von Null. Außerdem führt die gegenseitige Abstoßung der überschüssigen Ladungen dazu, dass sich das bewegliche „Meer“ an Elektronen so umverteilt, dass die Ladung in kürzester Zeit auf der gesamten Oberfläche erscheint.

schematische Darstellung



jedes hinreichend große Teilvolumen im Innern ist elektrisch neutral und feldfrei

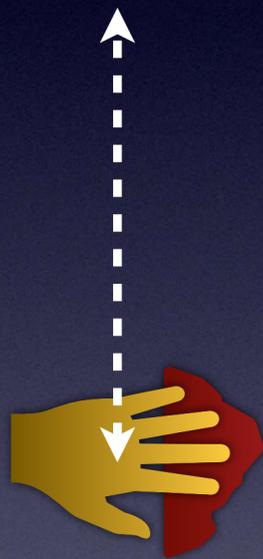
In einem Metall ist die Ladung über die gesamte Oberfläche verteilt (nicht unbedingt gleichmäßig).

<i>Eigenschaft</i>	Leiter	Isolator
mobile Ladungsträger vorhanden	<i>ja</i>	<i>nein</i>
Polarisierung	<i>das gesamte „Meer“ an Elektronen verschiebt sich</i>	<i>einzelne Atome oder Moleküle werden polarisiert</i>
elektrisches (Netto-) Feld im Inneren (stationär)	<i>Null</i>	<i>ungleich Null</i>
Ladungsüberschuss	<i>auf die gesamte Oberfläche verteilt</i>	<i>lokal, auf verschiedene Bereiche verteilt</i>

Kurze Zusammenfassung des Verhaltens von (elektrischen) Leitern und Isolatoren.

Anfangszustand

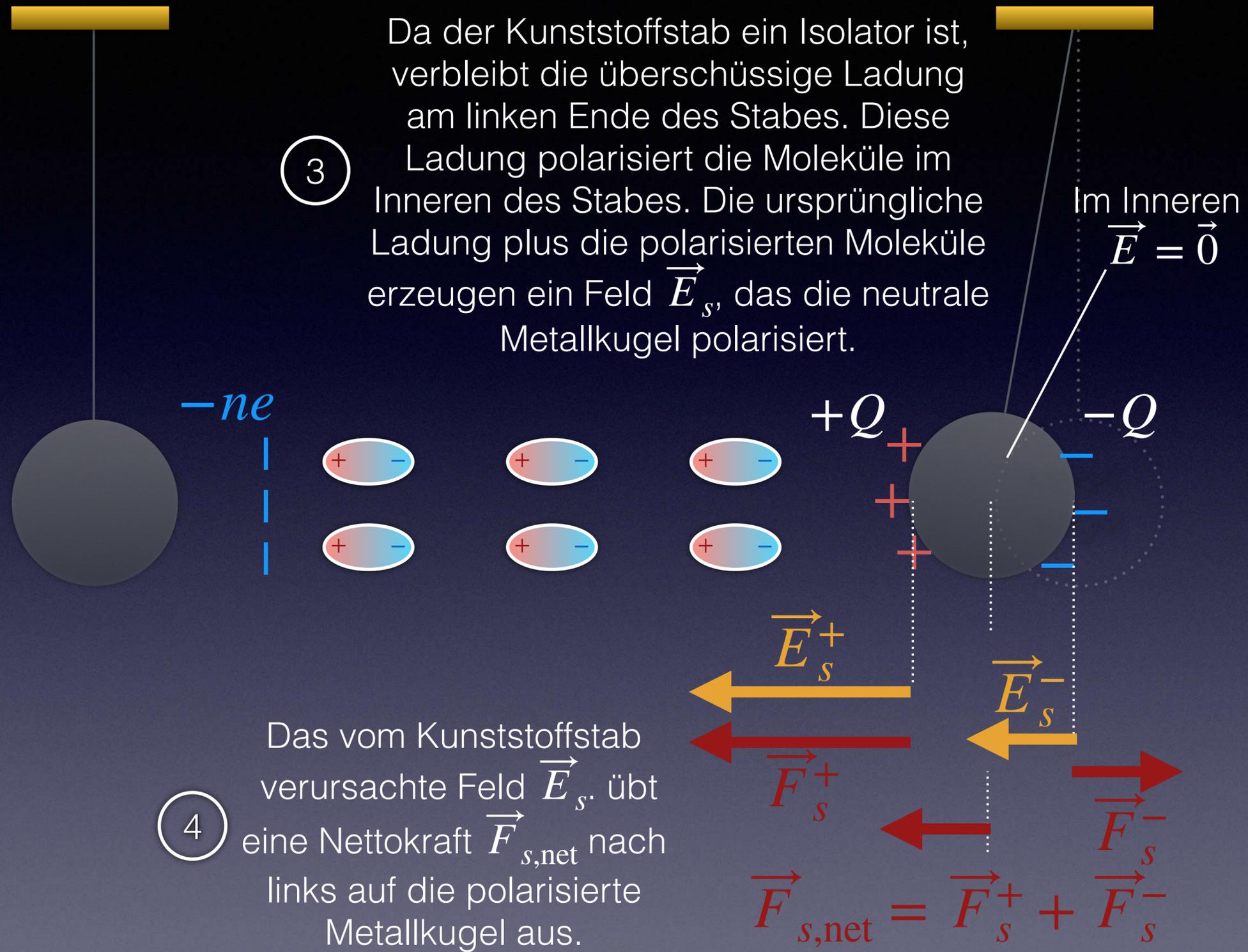
- 1 Eine leichte (leitende) Metallkugel hängt an einem Faden, rechts neben einem (isolierenden) Kunststoffstab. Beide sind zunächst ungeladen.



- 2 Du reibst das linke Ende des Kunststoffstabs mit Wolle, wodurch geladene Molekülfragmente entstehen, deren Gesamtladung negativ ist.

Endzustand

- 3 Da der Kunststoffstab ein Isolator ist, verbleibt die überschüssige Ladung am linken Ende des Stabes. Diese Ladung polarisiert die Moleküle im Inneren des Stabes. Die ursprüngliche Ladung plus die polarisierten Moleküle erzeugen ein Feld \vec{E}_s , das die neutrale Metallkugel polarisiert.



- 4 Das vom Kunststoffstab verursachte Feld \vec{E}_s übt eine Nettokraft $\vec{F}_{s,\text{net}}$ nach links auf die polarisierte Metallkugel aus.

zur besseren Lesbarkeit sind die Vektoren versetzt eingezeichnet

Anfangszustand

Endzustand

- 1 Eine leichte (leitende) Metallkugel hängt an einem Faden, rechts neben einem (leitfähigen) Metallstab. Beide sind zunächst ungeladen.
- 2 Du reibst das linke Ende des Kunststoffstabs mit Wolle, wodurch geladene Molekülfragmente entstehen, deren Gesamtladung negativ ist.
- 3 Du berührst mit dem Plastikstab den Metallstab (Ladungstransfer).

4

Die überschüssige negative Ladung verteilt sich auf der gesamten Oberfläche des Metallstabs, der ein Leiter ist. Diese überschüssige negative Ladung polarisiert die Metallkugel. Die polarisierte Metallkugel wiederum polarisiert den negativ geladenen Metallstab etwas.

5

Das vom Metallstab verursachte Feld \vec{E}_s übt eine Nettokraft $\vec{F}_{s,net}$ nach links auf die polarisierte Metallkugel aus. Die Polarisierung der Kugel ist in diesem Fall größer als beim Plastikstab (vorangehende Folie), da sich mehr von der ursprünglichen Ladung $-ne$ in der Nähe der Kugel befindet.

Im Inneren
 $\vec{E} = \vec{0}$

Im Inneren
 $\vec{E} = \vec{0}$

\vec{E}_s^+

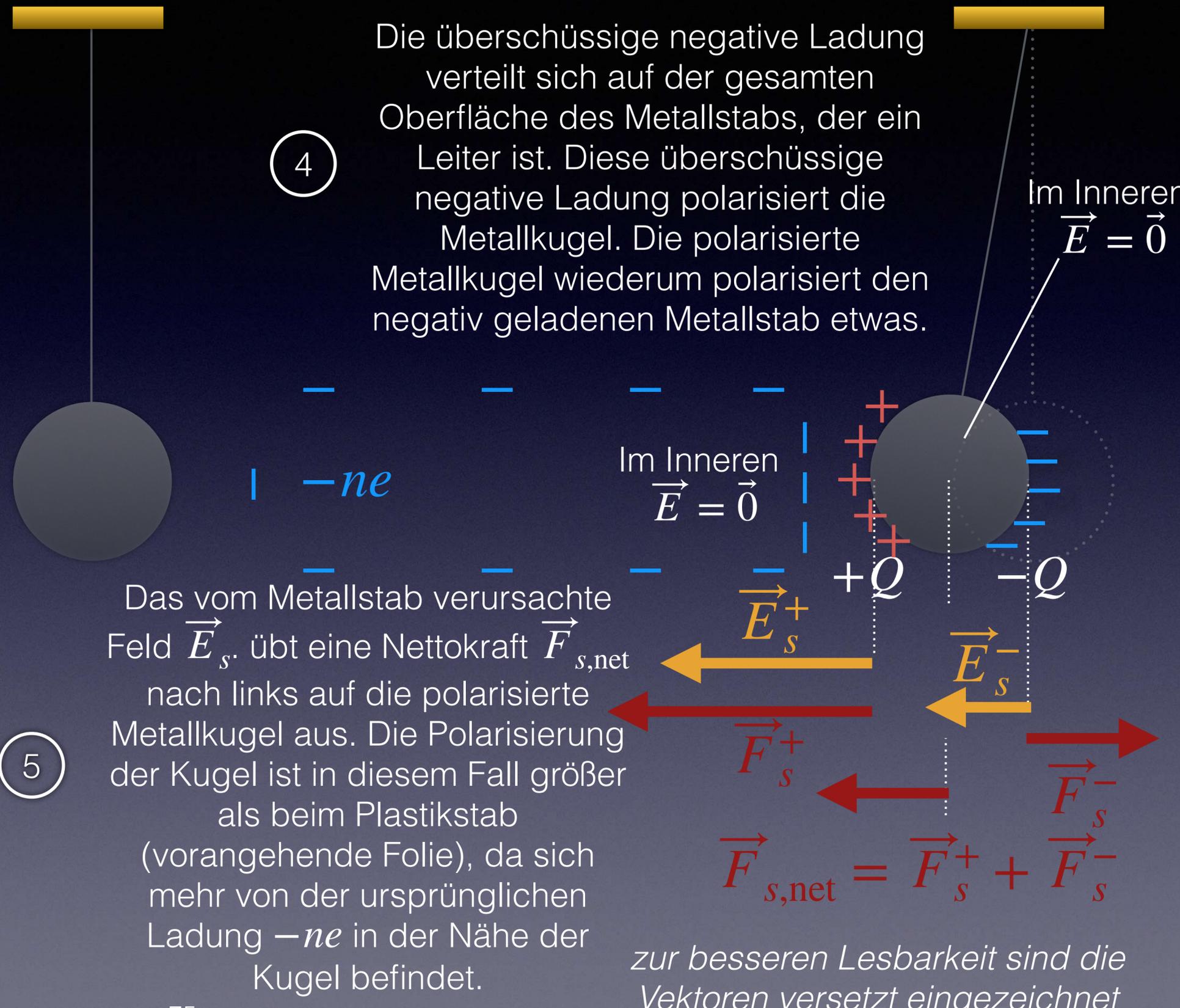
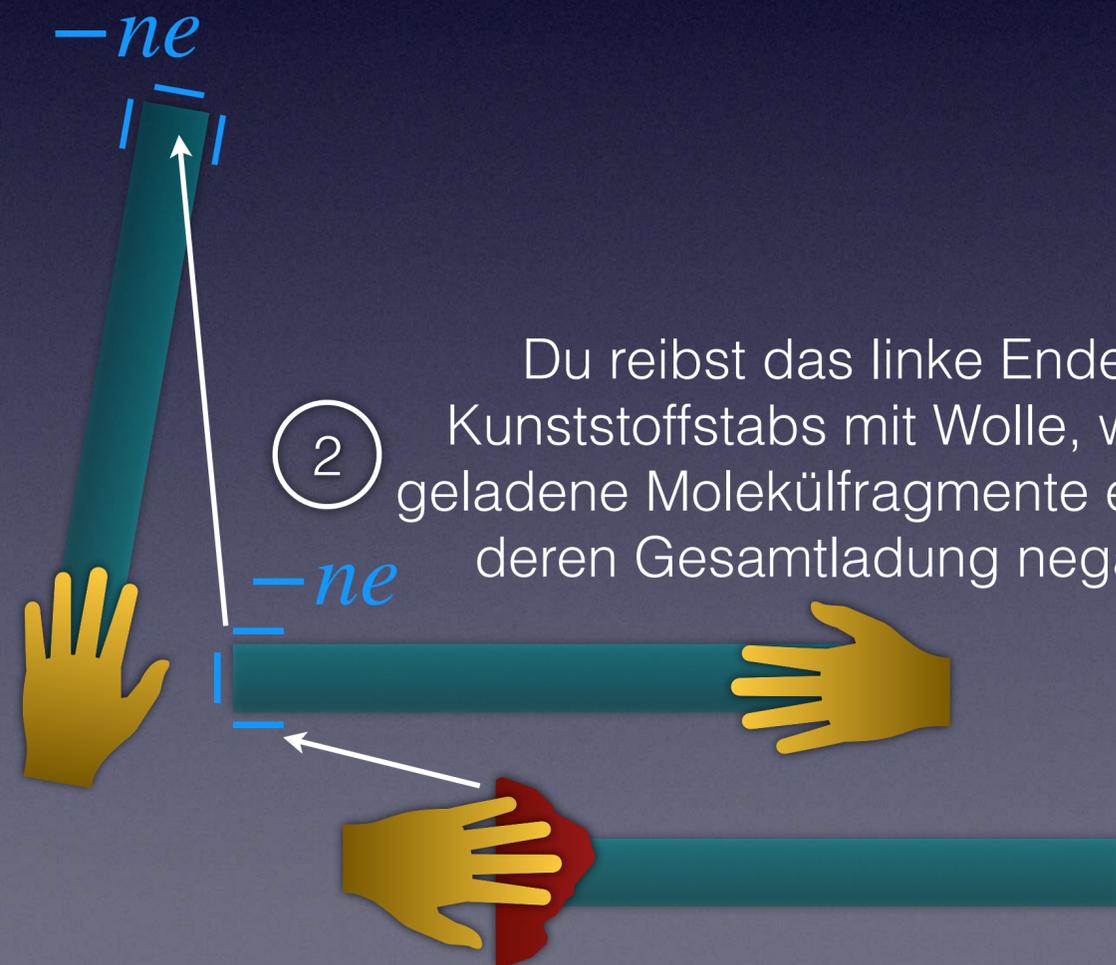
\vec{E}_s^-

\vec{F}_s^+

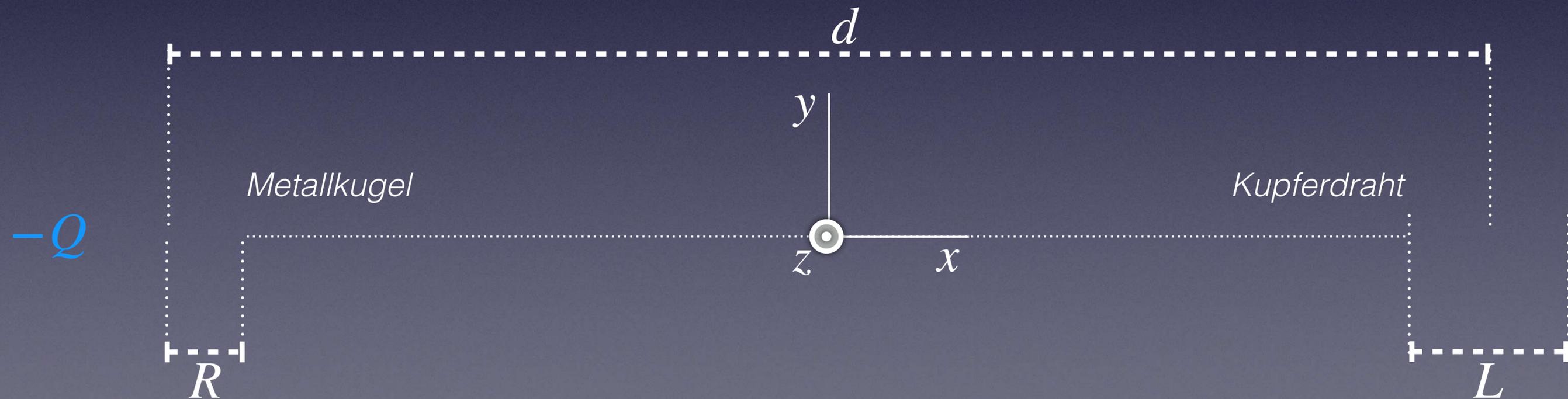
\vec{F}_s^-

$$\vec{F}_{s,net} = \vec{F}_s^+ + \vec{F}_s^-$$

zur besseren Lesbarkeit sind die Vektoren versetzt eingezeichnet

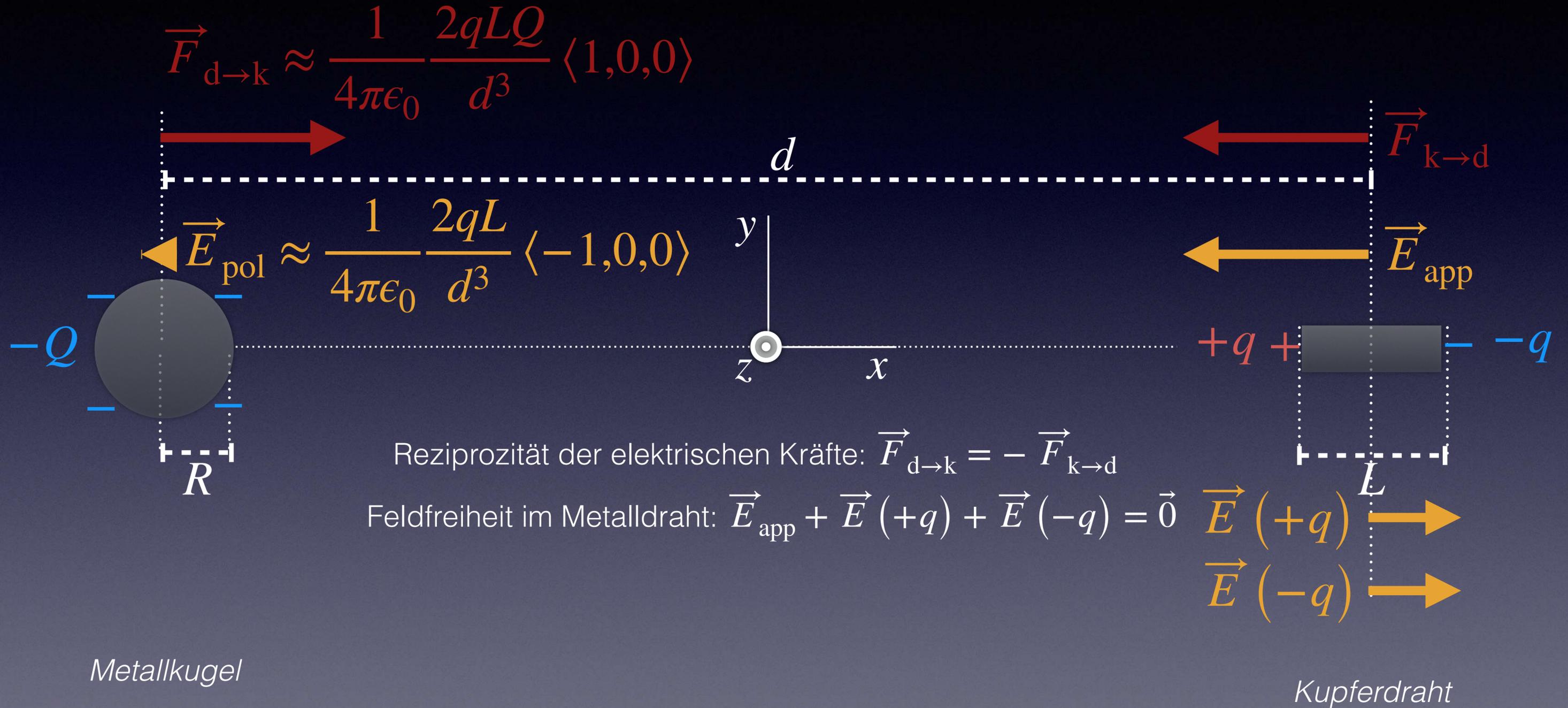


Der Mittelpunkt einer kleinen kugelförmigen Metallkugel mit dem Radius $R = 5 \text{ mm}$, die eine negative Ladung $Q = -1 \times 10^{-9} \text{ C}$ trägt, befindet sich in einer Entfernung $d = 10 \text{ cm}$ vom Mittelpunkt eines kurzen, dünnen, neutralen Kupferdrahtes der Länge $L = 4 \text{ mm}$. Die Kugel und der Draht werden „geeignet“ in Position gehalten (nicht dargestellt). Berechne die Kraft, welche die Kugel auf den Draht ausübt.



Die Metallkugel erzeugt ein elektrisches Feld \vec{E}_{app} , das den Draht polarisiert. Der polarisierte Draht erzeugt seinerseits ein elektrisches Feld \vec{E}_{pol} , das den Ball polarisiert. Aber nehmen wir an, dass wir den Effekt von \vec{E}_{pol} auf die Metallkugel vernachlässigen dürfen, so dass wir den Ball als Punktladung modellieren können. Der polarisierte Draht wird von der Kugel mit $\vec{F}_{\text{k} \rightarrow \text{d}}$ angezogen, und die Kugel wird von dem polarisierten Draht mit $\vec{F}_{\text{d} \rightarrow \text{k}}$ angezogen (Reziprozität der elektrischen Kräfte).

zur besseren Lesbarkeit sind die Vektoren versetzt eingezeichnet



Berechnung der polarisierten Ladung q auf dem Draht:

$$\vec{E}_{\text{app}} + \vec{E}(+q) + \vec{E}(-q) = \vec{0} \quad (\text{Feldfreiheit im Draht})$$

$$-\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{d^2} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(L/2)^2} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(L/2)^2} \approx 0 \quad (x\text{-Komponente})$$

$$q \approx \frac{1}{8} Q \left(\frac{L}{d} \right)^2 .$$

Kraft $\vec{F}_{d \rightarrow k}$ des Drahtes auf die Kugel:

$$\vec{F}_{d \rightarrow k} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2qLQ}{d^3} \langle 1, 0, 0 \rangle .$$

Mit dem Ergebnis für q von der vorangehenden Folie folgt

$$F_{d \rightarrow k, x} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2 L^3}{4d^5} \approx - F_{k \rightarrow d, x} .$$

Verdopplung $Q \rightarrow$ Doppeltes q , Vierfaches $\left| \vec{F} \right|$.

Verdopplung $d \rightarrow$ ein Viertel q , ein Zweiunddreißigstel $\left| \vec{F} \right|$.

Kontrollpunkt 7

1. Ein Gegenstand kann sowohl geladen als auch polarisiert sein. Bei einer negativ geladenen Metallkugel sei die Ladung gleichmäßig über die gesamte Oberfläche verteilt. Wird eine positive Ladung in die Nähe gebracht, so polarisiert sich die geladene Kugel - wenn eine der folgenden Größen Null ist, so gib dies ausdrücklich an. (1) Zeichne die ungefähre endgültige Ladungsverteilung auf der Kugel. (2) Zeichne das elektrische Feld \vec{E}^+ im Mittelpunkt der Kugel, das durch die äußere positive Ladung entsteht. (3) Zeichne das elektrische Feld \vec{E}^- im Mittelpunkt der Kugel, das durch die Ladung auf der Oberfläche der Kugel entsteht. (4) Zeichne das elektrische Netto-Feld \vec{E}_{net} im Mittelpunkt der Kugel.

Kontrollpunkt 8

1. Betrachte einen negativ geladenen Kunststoffstift, der in die Nähe einer neutralen, massiven Metallkugel gebracht wird - wenn eine der folgenden Größen Null ist, so gib dies ausdrücklich an. (1) Zeichne die ungefähre Ladungsverteilung für die Metallkugel. (2) Zeichne einen Vektor, der die Nettokraft \vec{F}_{net} darstellt, die der Stift auf die Metallkugel ausübt, und erkläre „deinen“ Kraftvektor kurz, aber vollständig, einschließlich aller relevanten Wechselwirkungen. (3) Zeichne das elektrische Feld \vec{E}^- im Mittelpunkt der Kugel, das durch die äußere negative Ladung entsteht. (4) Zeichne das elektrische Feld \vec{E}^0 im Mittelpunkt der Kugel, das durch die Ladung auf der Oberfläche der Kugel entsteht. (5) Zeichne das elektrische Netto-Feld \vec{E}_{net} im Mittelpunkt der Kugel.

Kontrollpunkt 9

1. Ersetze die massive Metallkugel aus dem vorangehenden „Kontrollpunkt 8“ durch eine massive Kunststoffkugel. (1) Stelle die ungefähre Ladungsverteilung für die Kunststoffkugel grafisch dar. (2) Zeichne einen Vektor, der die Nettokraft \vec{F}_{net} darstellt, die der Stift auf die Kunststoffkugel ausübt und erkläre „deinen“ Kraftvektor kurz, aber vollständig, einschließlich aller relevanten Wechselwirkungen.

Übertragen von Ladung

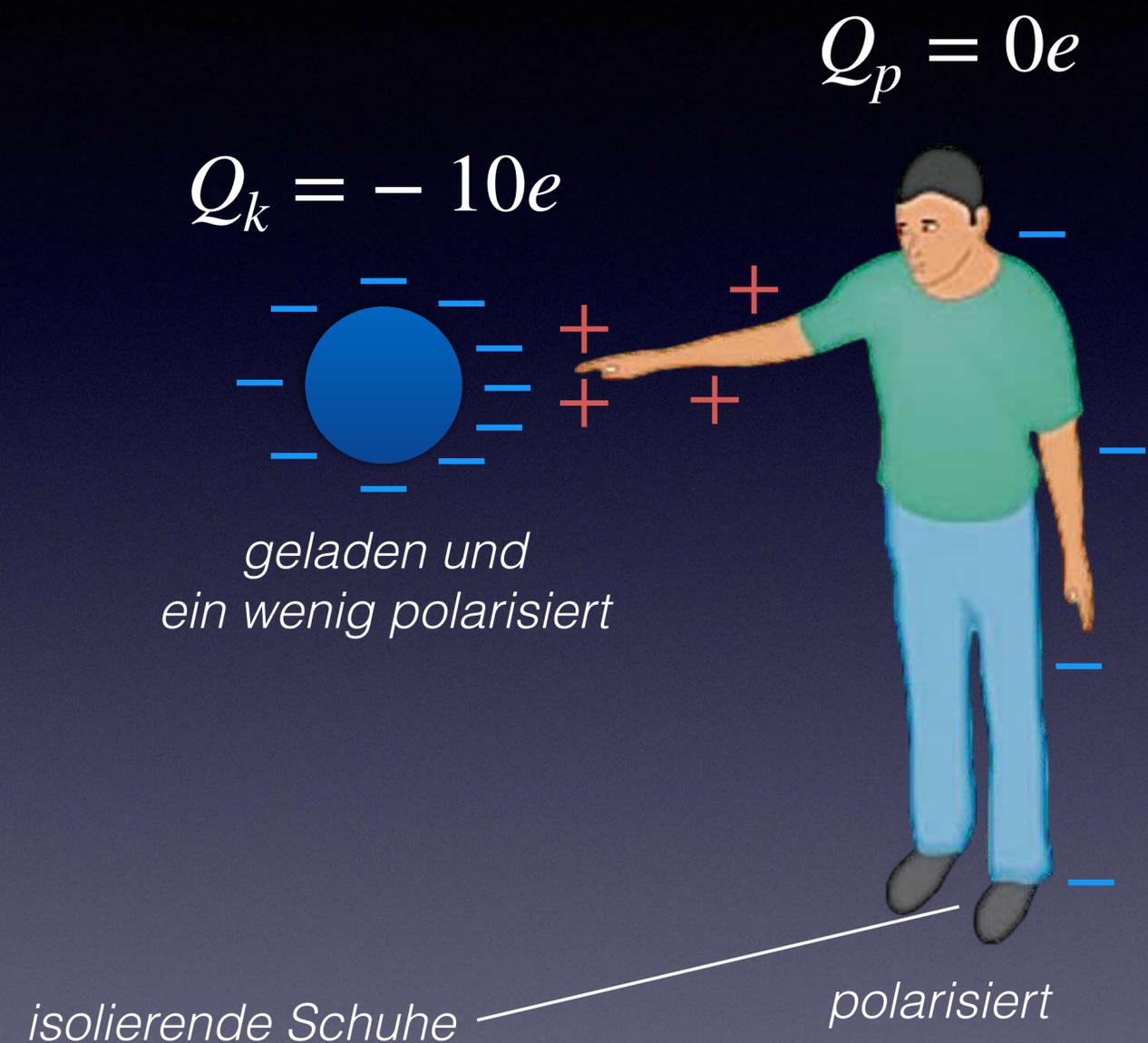
Wir haben gesehen, dass Gegenstände aus Isolatoren oft eine Nettoladung ungleich Null erhalten können, wenn sie an einem anderen Isolator gerieben werden. Wir haben mögliche Mechanismen für die Übertragung von Ladung zwischen einem isolierenden Objekt und einem anderen erörtert, darunter die Übertragung von positiven oder negativen Ionen und die Übertragung von Elektronen.

Da ein leitendes Objekt bewegliche geladene Teilchen enthält, ist der Prozess des Aufladens oder Entladens eines Leiters mit einem Fluss von geladenen Teilchen von einem Leiter zum anderen verbunden. So können beispielsweise Elektronen eines Metallgegenstands in einen anderen Metallgegenstands wandern, wenn die Gegenstände miteinander in Kontakt kommen.

Auch wenn du dich bisher vielleicht nicht als elektrischen Leiter betrachtet hast, spielt dein eigener Körper bei einigen Arten von Auf- und Entladungsphänomenen eine interessante Rolle. In der folgenden Diskussion wirst du sehen, weshalb.

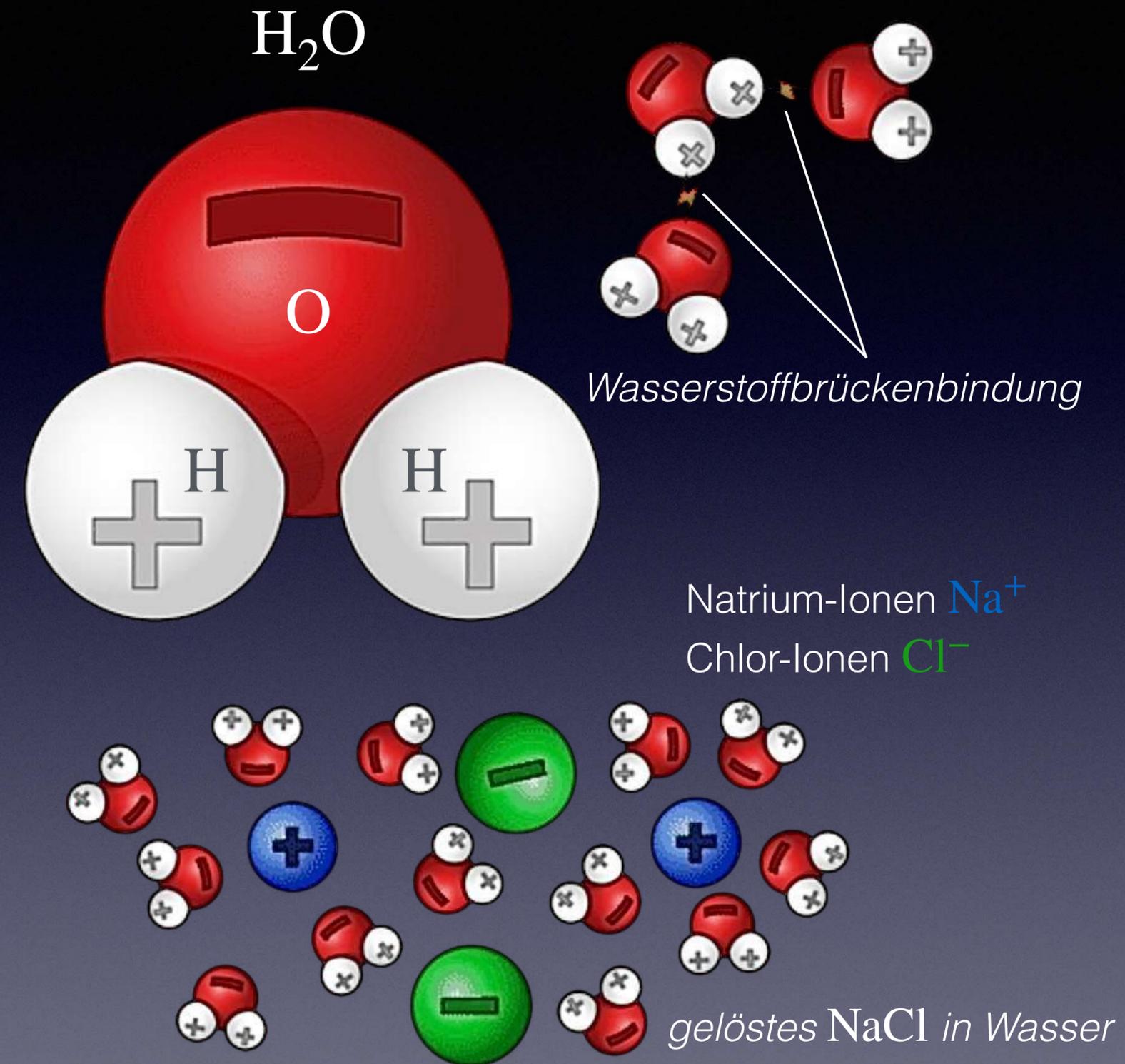
Wenn du Sport treibst, schwitzt du, und dein Körper wird mit einer Schicht Salzwasser bedeckt. Selbst an kühlen Orten und in Ruhe, ist deine Haut normalerweise mit einer dünnen Schicht Salzwasser bedeckt. Wie wir bereits gesehen haben, ist Salzwasser ein Leiter, so dass sich auf deiner gesamten Hautoberfläche ein leitender Flüssigkeitsfilm befindet.

Wenn du dich einem negativ geladenen Objekt näherst, polarisiert dein Körper, wie nebenstehend dargestellt. Die Polarisierung umfasst nicht nur die atomare oder molekulare Polarisierung, sondern auch die Polarisierung von Blut und Schweiß, die salzhaltige Lösungen sind.

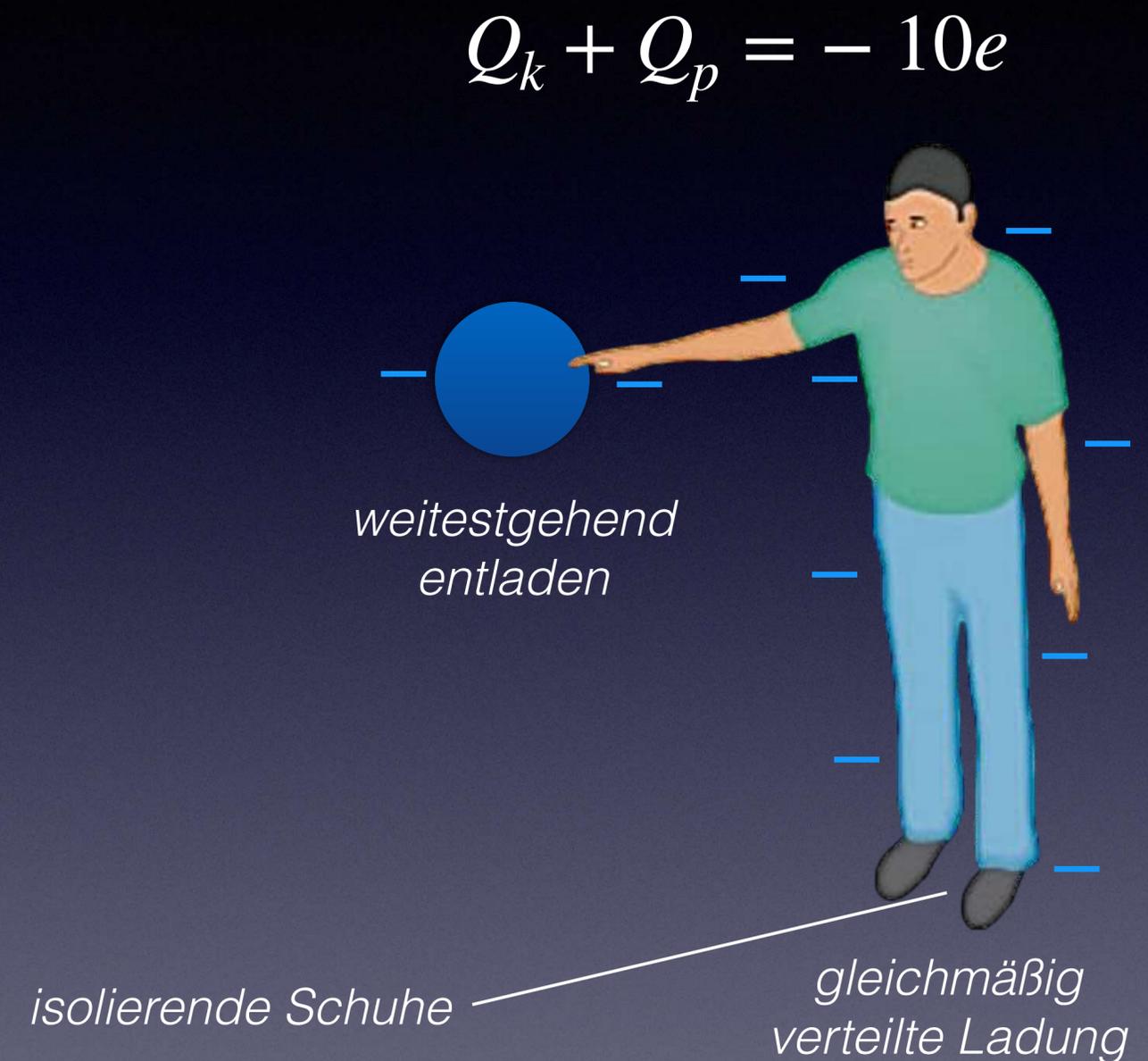


Exkurs: Auf molekularer Ebene löst sich Salz **NaCl** in Wasser **H₂O** aufgrund elektrischer Ladungen und aufgrund der Tatsache, dass sowohl Wasser als auch Salzverbindungen polar sind, also positive und negative Ladungen auf entgegengesetzten Seiten des jeweiligen Moleküls sitzen.

Die positiv geladene Seite der Wassermoleküle wird von den negativ geladenen Chloridionen angezogen und die negativ geladene Seite der Wassermoleküle wird von den positiv geladenen Natriumionen angezogen. Nach Aufspaltung der **NaCl**-Moleküle, sind die Natrium- und Chloridatome von Wassermolekülen umgeben. Sobald dies geschieht, ist das Salz aufgelöst und es entsteht eine homogene Lösung.

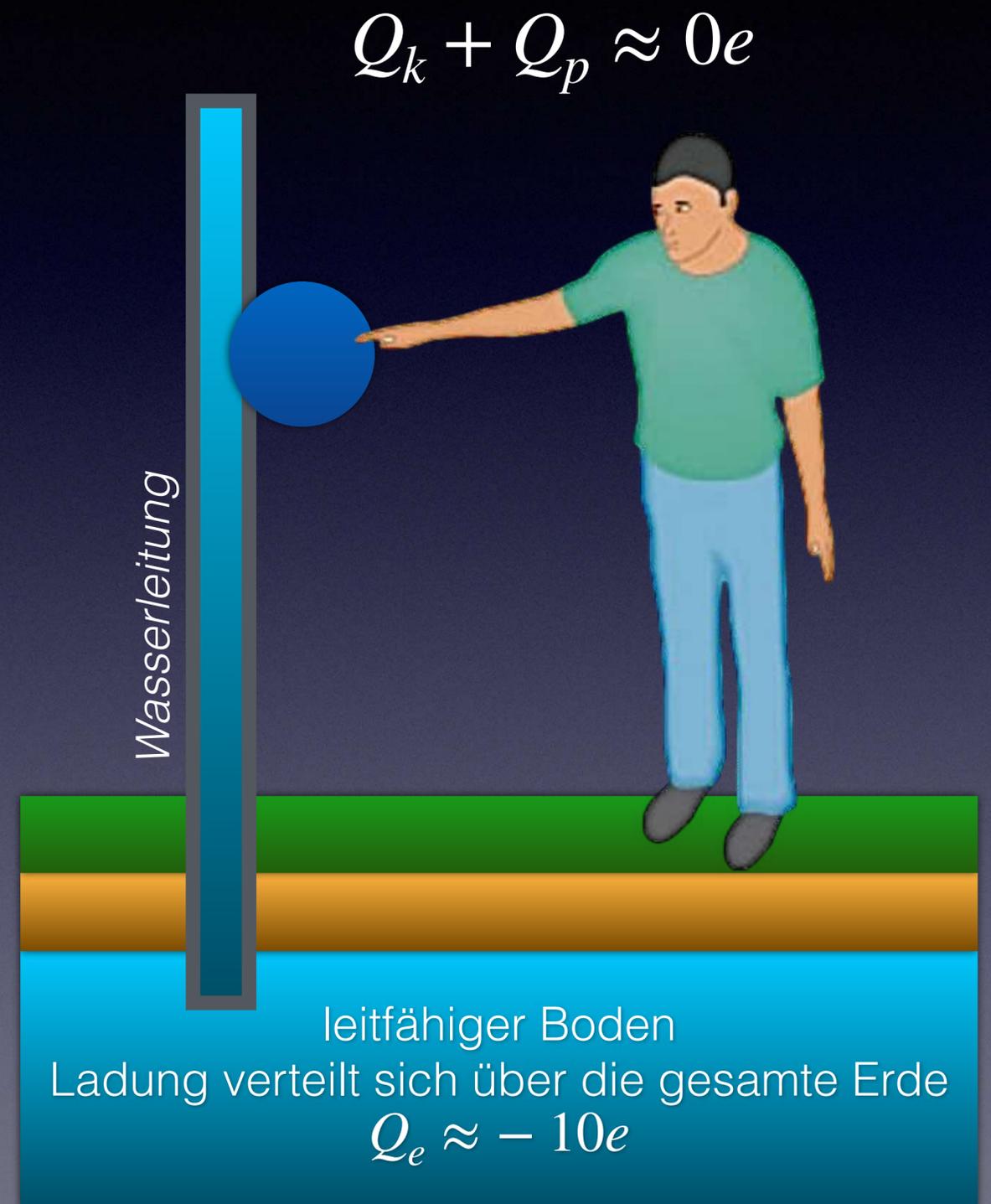


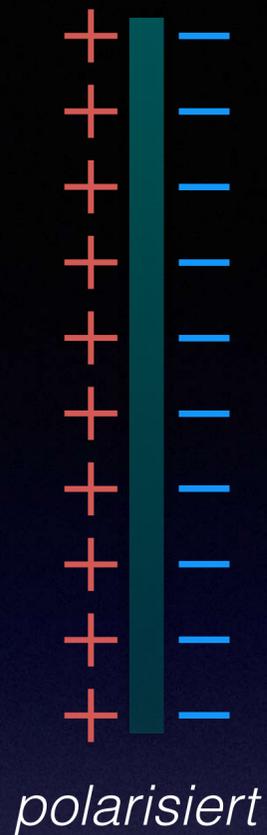
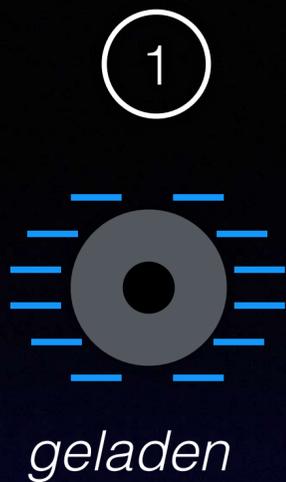
Wenn du das geladene Objekt berührst, zieht das negativ geladene Objekt Na^+ -Ionen aus dem Salzwasserfilm deiner Haut an. Die Na^+ -Ionen können ein Elektron aufnehmen und neutralisieren teilweise die überschüssige negative Ladung des Objekts. Dein Körper erhält eine negative Nettoladung. Im Falle eines kleinen Objekts aus Metall, auf dem sich die Ladung frei verteilen kann, wird das Metall durch diesen Prozess nahezu vollständig neutralisiert, da die ursprüngliche Nettoladung nun auf eine viel größere Fläche verteilt ist. In ähnlicher Weise würde ein positiv geladenes Metallobjekt Cl^- -Ionen von deiner Haut anziehen, die ein Elektron an das Metall abgeben. Der Körper erhält in dieser Situation eine positive Nettoladung.



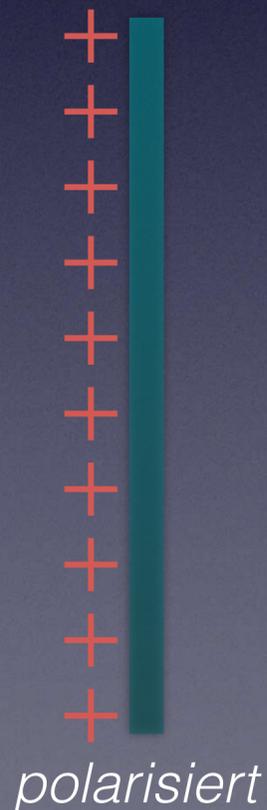
Das Berühren eines kleinen geladenen Objekts (Leiter) ist eine ziemlich effektive Methode, um das Objekt zu entladen, auch wenn du Schuhe mit isolierenden Sohlen trägst. Ein noch besserer Weg, ein leitendes Objekt zu entladen, ist, es zu „erden“, indem man eine gute Verbindung zur Erde oder zum Boden herstellt (typischerweise über eine Wasserleitung, die in den Boden führt).

Die Erde ist aufgrund des Vorhandenseins von wässrigen ionisierten Flüssigkeiten ein recht guter Leiter. Durch die Erdung wird die Ladung über einen sehr großen Bereich verteilt, wodurch ein Objekt im Wesentlichen vollständig entladen und damit neutralisiert wird.

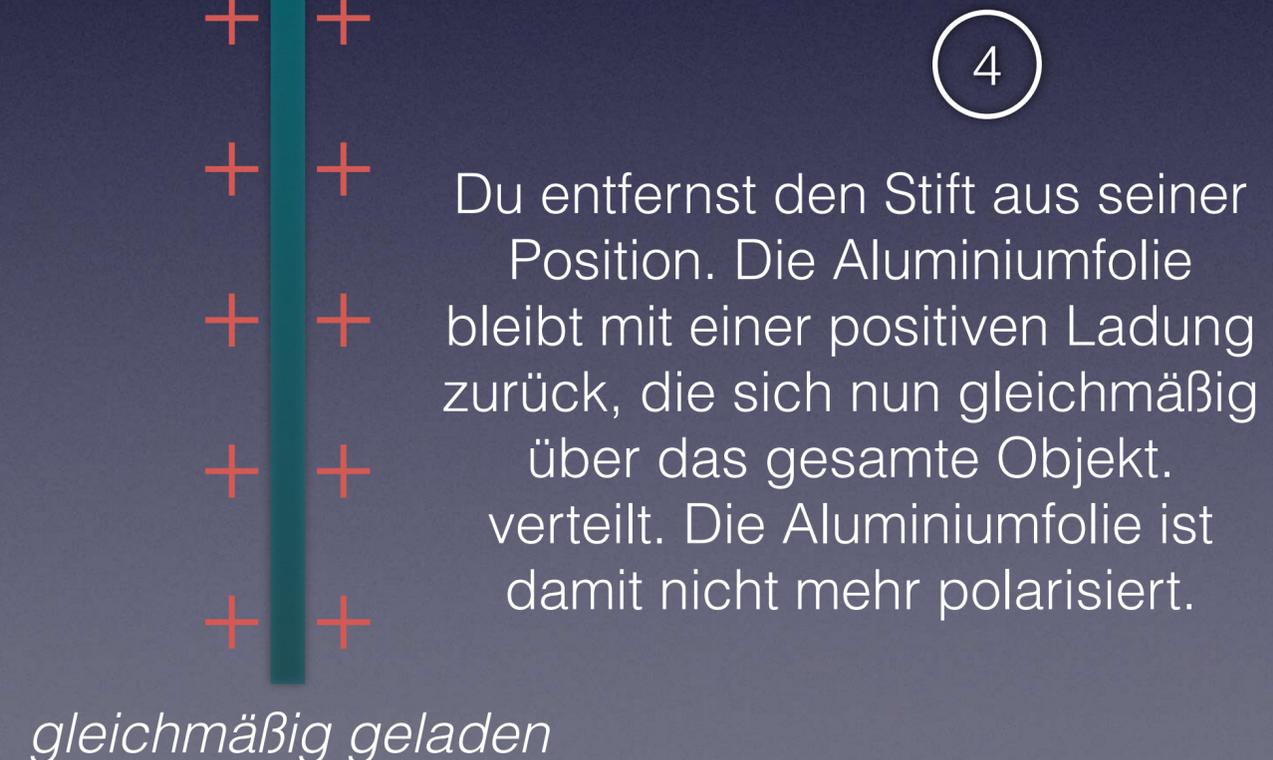




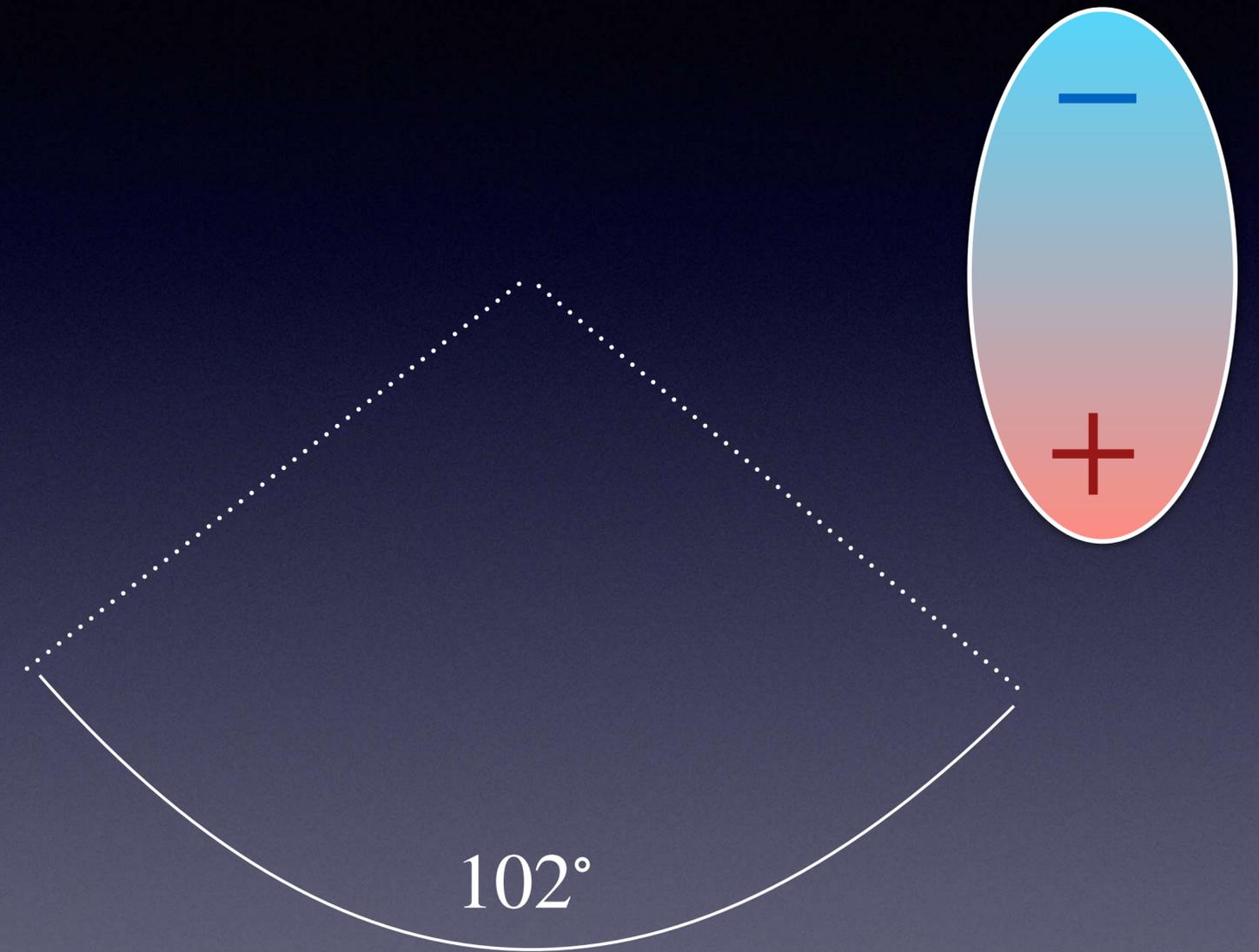
Es ist möglich, die Polarisierbarkeit eines Leiters auszunutzen, um ihn mit einer Nettoladung zu versehen, ohne ein geladenes Objekt zu berühren. Dieser Vorgang, der als „Aufladung durch Induktion“ bezeichnet wird, ist hier dargestellt. Ein Stück neutrale Aluminiumfolie ist isolierend aufgehängt. Man lädt einen Plastikstift auf und bringt ihn in die Nähe der neutralen Aluminiumfolie.



Du belässt den Stift in Position, ziehst aber deine Hand und Finger zurück, die negativ geladen sind. Die Aluminiumfolie bleibt mit einer positiven Ladung zurück, bleibt aber zunächst noch polarisiert.



Isolierte Atome sind immer symmetrisch und unpolarisiert, es sei denn, eine externe Ladung verschiebt die Elektronenwolke und erzeugt einen induzierten Dipol. Einige Moleküle sind jedoch auch ohne äußere Ladung dauerhaft polarisiert, was zu wichtigen physikalischen und chemischen Effekten führt. Wassermoleküle zum Beispiel sind permanent polarisiert. Das Wassermolekül (H_2O) ist nicht kugelsymmetrisch, sondern hat beide Wasserstoffatome auf einer Seite des Sauerstoffatoms. Die nebenstehende Abbildung veranschaulicht, dass das Wassermolekül ein permanenter Dipol ist.



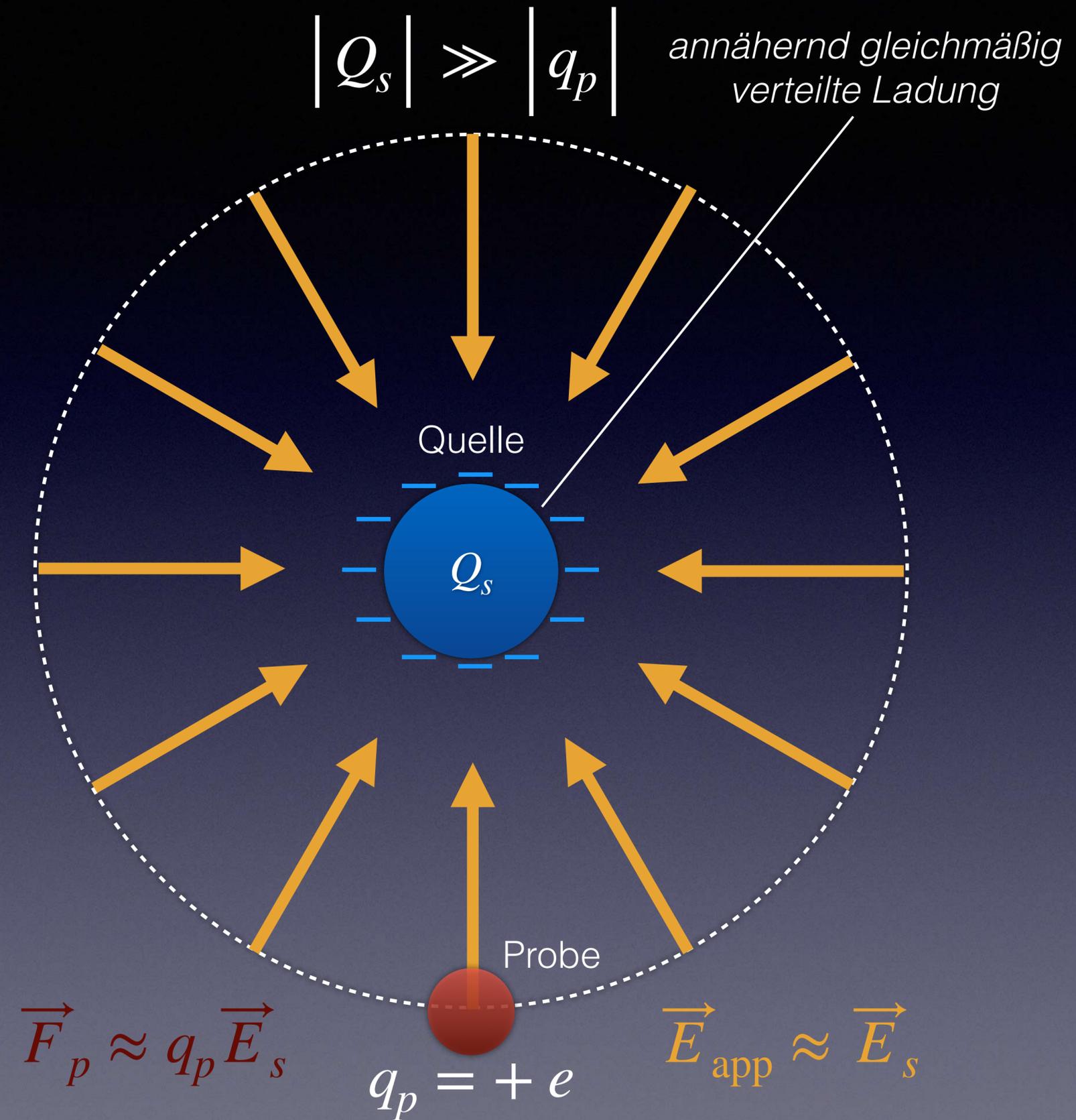
Das Wassermolekül H_2O als permanenter Dipol.

Viele der ungewöhnlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften von Wasser sind auf diese Struktur zurückzuführen. Vor allem können sich die geladenen Enden mit Ionen verbinden, weshalb sich viele Chemikalien sehr gut in Wasser lösen.

Wenn Wassermoleküle in der Luft (Luftfeuchtigkeit) auf eine Oberfläche treffen, bleiben sie manchmal an der Oberfläche haften (Wasserfilm), wahrscheinlich weil sich die geladenen Enden an die Oberfläche binden. Reines Wasser ist ein sehr schlechter Leiter, enthält aber geringe Mengen mobiler H^+ und OH^- Ionen. Noch wichtiger ist, dass sich in Wasser Additive wie Salz lösen und damit einen effektiven Weg für die Übertragung von Ladungen auf andere Objekte bietet. So verliert ein geladenes Objekt allmählich seine ursprüngliche Ladung, so dass entsprechende Experimente besser bei geringer Luftfeuchtigkeit funktionieren.

Praktische Probleme bei der Messung eines elektrischen Feldes

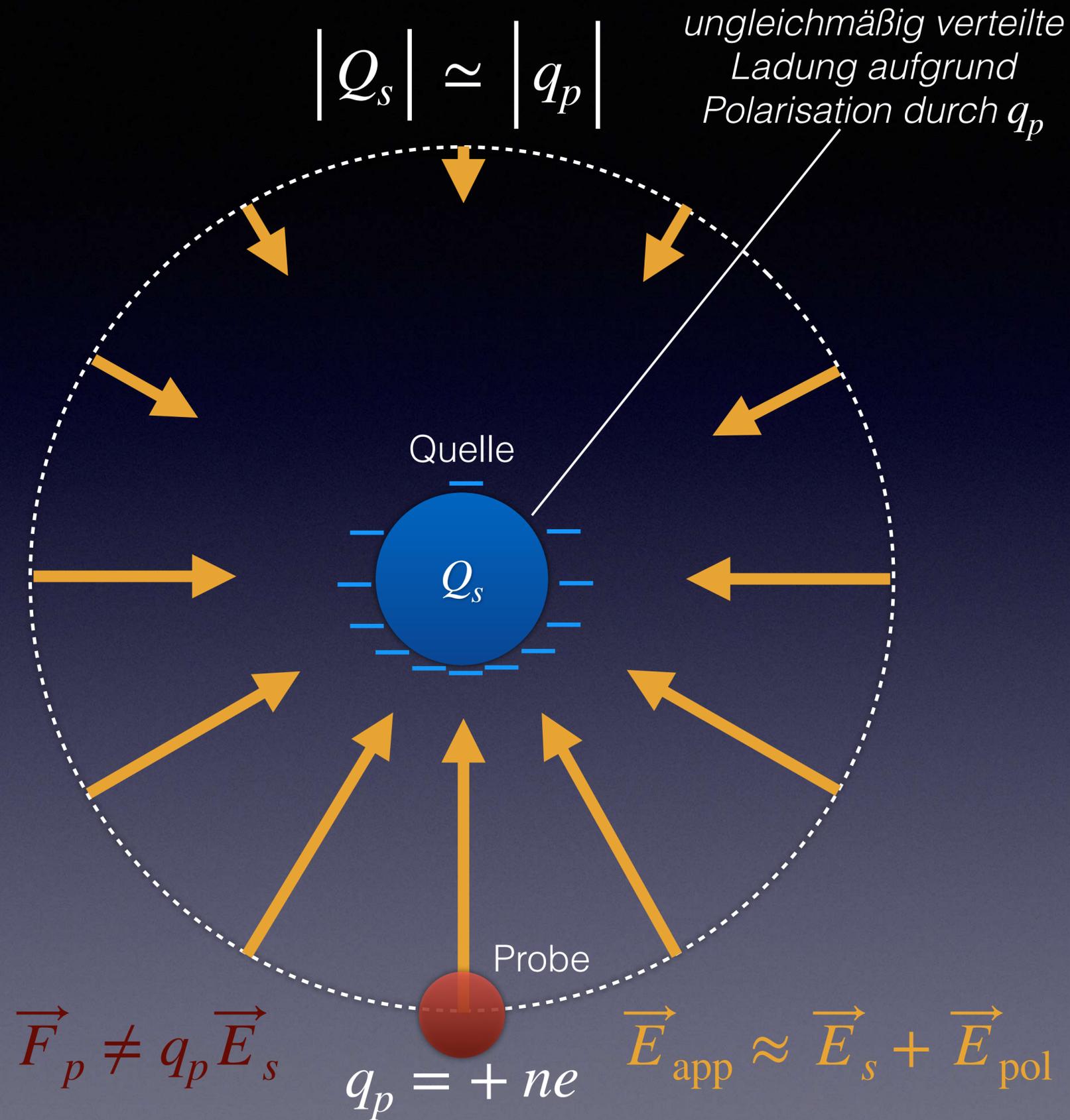
Es gibt praktische Probleme bei der Messung des elektrischen Feldes, indem man eine (Probe-) Ladung irgendwo platziert und die Kraft darauf misst, falls die (Probe-) Ladung die ursprüngliche Verteilung der Ausgangsladungen erheblich verändert. Betrachten wir eine negativ geladene Metallkugel. Das elektrische Feld, das von der Kugel ausgeht, ist radial nach innen gerichtet. Bringt man eine Probe mit sehr geringer Ladung in die Nähe dieser geladenen Kugel (z. B. ein einzelnes Proton), so ändert dies die Ladungsverteilung auf der Metallkugel kaum.



Wenn wir jedoch eine Probe mit einer großen Ladung in der Nähe der Kugel platzieren, polarisiert die Kugel in erheblichem Maße. Offensichtlich ist die Kraft \vec{F}_p auf die Probe nicht einfach proportional zu $|\vec{E}_s|$ sondern

proportional zu

$$|\vec{E}_s + \vec{E}_{pol}| > |\vec{E}_s|.$$



Da kein Objekt eine geringere Ladung haben kann als e (die Ladung eines Protons oder Elektrons), ist es manchmal nicht möglich, eine (Probe-) Ladung zu finden, die so klein ist, dass sie die Anordnung der Quellen nicht stört. In diesem Fall können wir das elektrische Feld nicht messen, ohne das Feld zu verändern!

Wir könnten jedoch das Feld der Quellen verwenden, um die Polarisierung eines neutralen Atoms an diesem Ort vorherzusagen, da ein neutrales Atom, selbst wenn es (leicht) polarisiert ist, die bestehende Anordnung der Quellen viel weniger stören würde als ein geladenes Objekt (ein Dipolfeld klingt mit $1/|\vec{r}|^3$ sehr viel rascher ab als das Feld einer Punktladung mit $1/|\vec{r}|^2$). Im Umkehrschluss könnte die Platzierung eines neutralen Atoms an einem Ort und die Beobachtung seiner Polarisation eine weniger nachteilige Methode zur Messung eines elektrischen Feldes an diesem Ort sein.

Eine weitere Möglichkeit, die Messung zu verbessern, wäre die Messung für eine positiv geladene Probe und zusätzlich auch für eine negativ geladene Probe zu messen:

$$\vec{E}_s^+ = \frac{\vec{F}^+}{+q} \quad \text{und} \quad \vec{E}_s^- = \frac{\vec{F}^-}{-q}.$$

Da die verschiedenen (Probe-) Ladungen die Quelle(n) mit unterschiedlichen Vorzeichen polarisieren, kann \vec{E}_s durch den Mittelwert

$$\vec{E}_s \approx \frac{1}{2} \left(\vec{E}_s^+ + \vec{E}_s^- \right)$$

angenähert werden.

Antworten
(zu den „Kontrollpunkten“)

K1.1: (1) $Q_{\text{net}} = 0 \text{ C}$. (2) $Q_{\text{net}} = -e \approx -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

K2.1: Der Fragesteller hat (vielleicht) die Konsequenzen des Superpositionsprinzip vergessen zu berücksichtigen: Elektrische Wechselwirkungen gehen durch Materie hindurch, so dass die Wirkung des positiven Kerns nicht durch die umgebende Elektronenwolke blockiert wird. Im Kern befinden sich genau so viele Protonen wie Elektronen, und normalerweise ist die Elektronenwolke auf den Kern zentriert, so dass der Nettoeffekt gleich Null ist.

K3.1: (1) $|\vec{p}_{\text{ind}}| = 3 \times 10^{-34} \text{ C} \cdot \text{m}$. (2) $s = 1.875 \times 10^{-15} \text{ m}$.

K4.1: $2^{-5} = 1/32$.

K4.2: Ganz analog zu Folie 55, jedoch für eine negative Ladung.

K4.3: Nicht unbedingt. Selbst wenn der Bleistift ungeladen ist, wird das geladene Klebeband den Bleistift polarisieren und durch die induzierten Dipole angezogen werden.

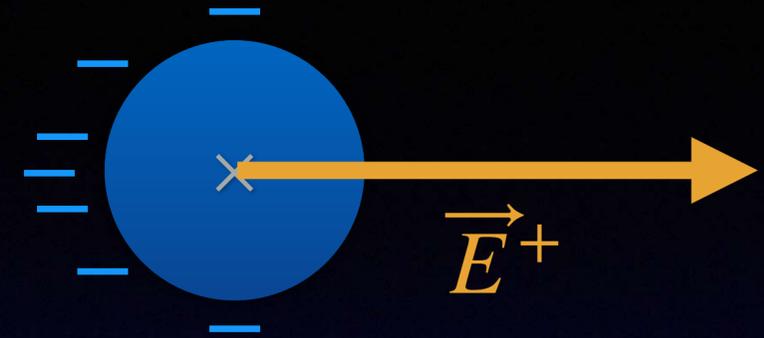
K4.4: Polarisierung verursacht immer eine Nettoanziehung. Die Abstoßung eines induzierten Dipols kann nicht stattfinden. Daher ist die Abstoßung ein besserer Test dafür, ob ein Objekt (gleichartig) geladen ist.

$$\underline{\text{K5.1:}} \quad \left| \vec{v}_{\text{drift}} \right| \approx 1.5 \times 10^{-5} \text{ m/s} .$$

$$\underline{\text{K6.1:}} \quad \left| \vec{E}_{\text{app}} \right| \approx 2.2 \times 10^{-11} \text{ N/C} .$$

Metallkugel mit ursprünglich homogener Ladungsverteilung

K7.1 (2)

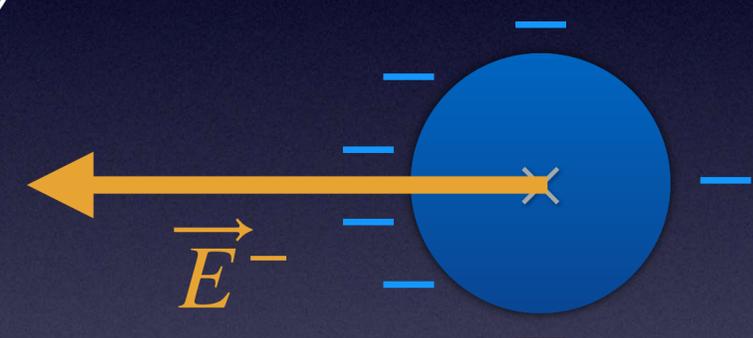


K7.1 (1)

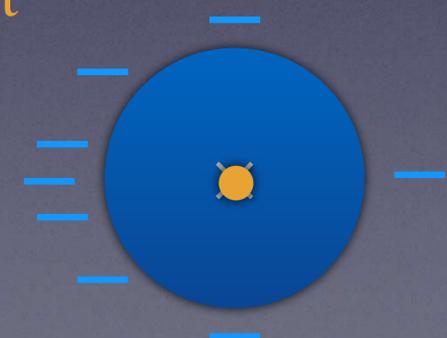


ungleiche Ladungsverteilung durch Polarisierung

K7.1 (3)



K7.1 (4)



$$\vec{E}_{\text{net}} = \vec{E}^+ + \vec{E}^- = \vec{0}$$

zur besseren Lesbarkeit sind die Vektoren teilweise versetzt eingezeichnet

K8.1 (1)



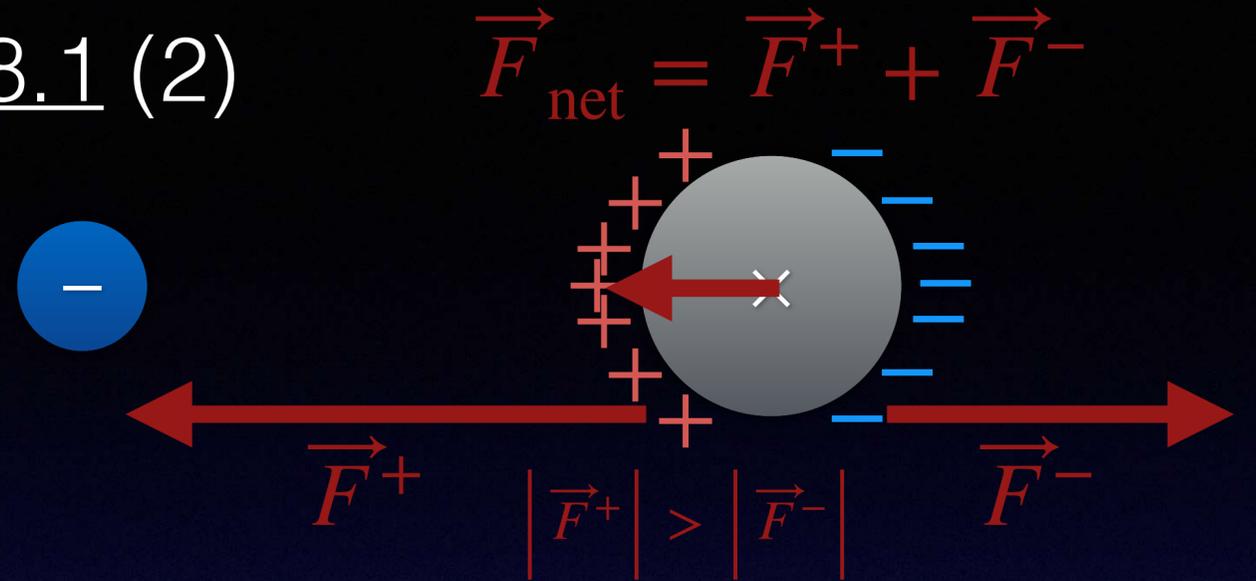
Metallkugel, neutral

ungleiche Ladungsverteilung durch Polarisierung

K8.1 (5)

$$\vec{E}_{\text{net}} = \vec{E}^0 + \vec{E}^- = \vec{0}$$

K8.1 (2)



K8.1 (3)

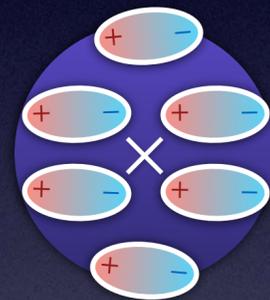


K8.1 (4)



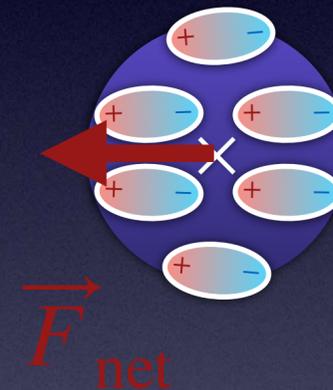
Kunststoffkugel, neutral

K9.1 (1)



Polarisierung der Moleküle

K9.1 (2)



Anziehende Nettokraft \vec{F}_{net} , da alle positiven Bereiche der polarisierten Moleküle etwas näher zur externen negativen Ladung liegen, als die negativen Bereiche der Moleküle.

Nachwort

Die Folien versuchen eine Einführung in die Physik aus der Perspektive des 20. Jahrhunderts zu geben. Physiker erstellen Modelle der natürlichen Welt, die auf einer kleinen Anzahl grundlegender physikalischer Prinzipien und auf einem Verständnis der mikroskopischen Struktur der Materie beruhen, und sie wenden diese Modelle an, um ein sehr breites Spektrum physikalischer Phänomene zu erklären und vorherzusagen.

Abfolge und Inhalt dieser Folien lehnen sich ganz eng an das Buch *Matter and Interactions* von Ruth W. Chabay und Bruce E. Sherwood an (4. Auflage, November 2017, 1040 Seiten, eText, Wiley & Sons Ltd, ISBN: 978-1-119-02908-3). Abbildungen, soweit nicht anders erwähnt, entstammen ebenfalls diesem Buch.

Ende

Folien zusammengestellt von Günther Lang

Es folgt: Teil 3 - Elektrisches Feld verteilter Ladungen