

# Theorien über die Entstehung statischer Elektrizität

## *Nur langsam fortschreitende Erkenntnisse*

Die Lehren von der Elektrostatik, d.h. vom Verhalten von Ladungen nach ihrer Trennung, und von der Elektrodynamik, d.h. vom Verhalten sich bewegender Ladungen (Ströme), seien sie nun getrennt oder ungetrennt, wurden weitgehend im Verlaufe des 19. Jahrhunderts entwickelt. Im Gegensatz dazu ist der Stand unseres Wissens vom Entstehen statischer Elektrizität oder Kontaktelektrizität – obwohl hier die Untersuchungen mindestens so früh einsetzen wie in den anderen Sparten – noch primitiv, und dieses Fachgebiet kann mit Fug als der rückständigste Zweig der Wissenschaft von den elektrischen Erscheinungen angesehen werden. Den Hauptgrund hierfür dürfte der nur zu sehr verdiente Ruf launischen Verhaltens bilden, den die statische Elektrizität sich erworben hat. Niemand arbeitet gerne mit aller Sorgfalt Theorien aus, um eine Reihe von Tatsachen zu erklären, die ihrerseits wahrscheinlich vom nächsten Experimentator bestritten werden. Das hatte zur Folge, daß sich nur wenige Physiker intensiv mit statischer Elektrizität befaßten und, von wenigen ehrenwerten Ausnahmen abgesehen, nach einer oder zwei Publikationen dieses Thema bald aufgaben. So entstand eine recht magere Zufallsliteratur, fast ohne zusammenhängende Entwicklung. Immerhin haben verschiedene Forscher eine Reihe von Hypothesen aufgestellt, von denen wir einige im folgenden beschreiben wollen. Vorerst aber wollen wir überlegen, welche Tatsachen bekannt sind und somit einer Erklärung bedürfen und welche wir noch nicht kennen, aber doch kennen möchten.

## *Bekannte Tatsachen*

Wir haben folgende Tatsachen zu erklären:

1. Daß eine Ladungstrennung eintritt, wenn zwei ungleiche Oberflächen in Berührung kommen und wieder getrennt werden. Früher nahm man an, daß zum Entstehen der Ladung eine Reibung zwischen den Oberflächen notwendig sei, doch steht heute fest, daß dies nicht erforderlich ist, wenn die Oberflächen ungleich sind.

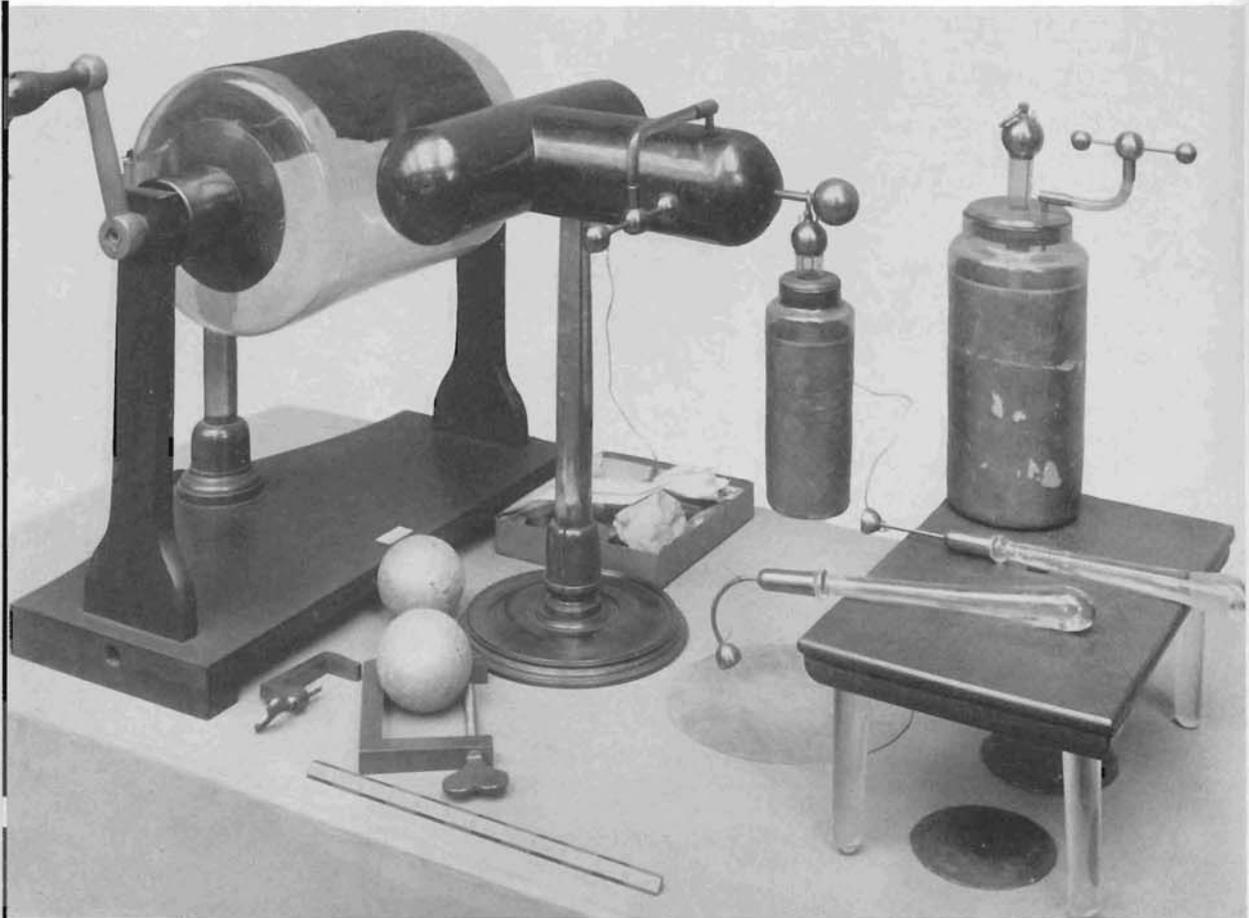
2. Daß Reibung gewöhnlich die Ladungen erhöht und gelegentlich deren Vorzeichen ändert.

3. Daß Ladungstrennung regelmäßig eintreten kann, wenn zwei gleiche Oberflächen auf asymmetrische Weise aneinander gerieben werden, d.h., wenn ein kleiner Teil der einen Oberfläche einen großen Teil der andern reibt.

4. Daß die Ladungen die verwirrende Gewohnheit haben, ihre Vorzeichen aus kaum ersichtlichem Anlaß zu wechseln. Einige Forscher haben auf die Möglichkeit hingewiesen, eine Anzahl von Substanzen in einer «elektrostatischen Reihe» anzuordnen, so daß sie stets positiv werden, wenn man sie an andern, unter ihnen liegenden Substanzen dieser Reihe reibt. Andere Forscher wiederum haben die gleichen Substanzen anders angeordnet oder auch festgestellt, daß es unmöglich sei, folgerichtige Reihen aufzustellen.

5. Daß, falls beträchtliche Teile von zwei Oberflächen miteinander wirklich in Berührung gewesen sind, die Ladungen nach der Trennung per Oberflächeneinheit oft dem Maximum dessen entsprechen, was in Luft ohne Entladung möglich ist. Das legt die Vermutung nahe, daß die Ladungen ursprünglich größer waren und durch Entladung bei Trennung der Oberflächen auf die beobachteten Werte abgesunken sind.

6. Es wurde festgestellt, daß gewisse die Vorzeichen der Ladungen bestimmende Regeln für begrenzte Gruppen von Substanzen gelten. Sind z.B. zwei Substanzen vorhanden, von denen die eine sauer, die andere basisch ist, die aber im übrigen einander ähnlich sind, so wird die saure Oberfläche gewöhnlich negativ, die basische positiv (vgl. besonders die Experimente Medleys mit Ionenaustausch-Kunstharzen und diejenigen von Shaw mit verschieden behandelten Glasoberflächen). Cöhn kam zum Schluß, daß die Substanz



mit der größeren Dielektrizitätskonstante positiv wird. Dies trifft sicher nicht allgemein zu, doch ist die Feststellung in bezug auf die besonderen Probestücke, mit denen Cöhn arbeitete, ohne Zweifel richtig.

*Noch unbeantwortete Fragen*

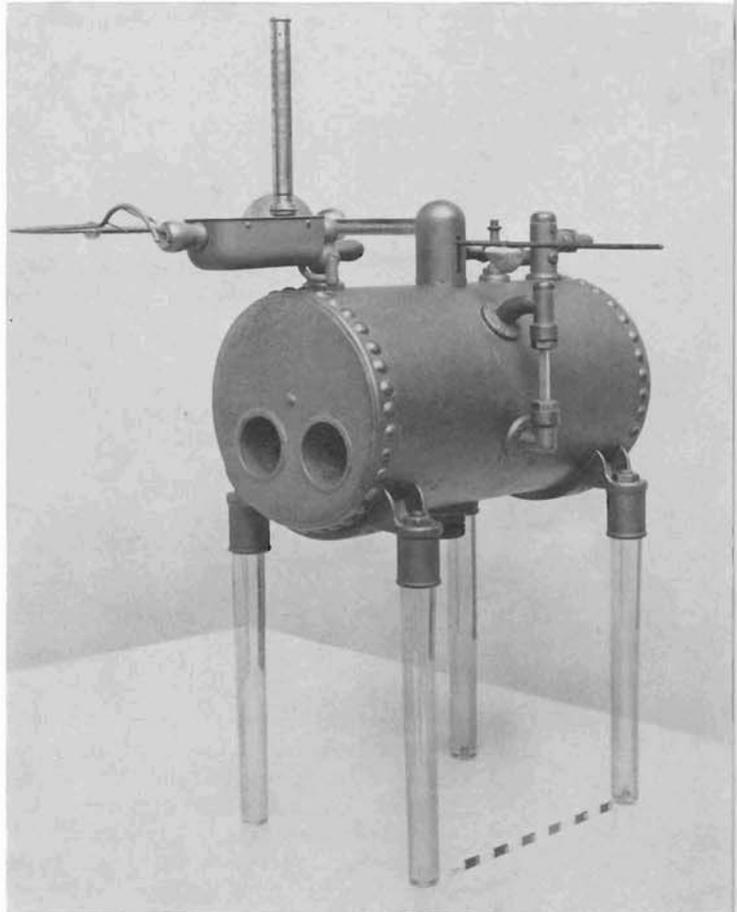
Bevor wir versuchen, den gegenwärtigen Stand der Theorie der Kontaktelektrizität zu beschreiben, dürfte es von Nutzen sein, einige wenige Dinge aufzuzählen, die wir nicht kennen oder über die wir bestenfalls im ungewissen sind. Dadurch wird sich unsere große Unwissenheit auf diesem Gebiet enthüllen.

1. Beruhen die Erscheinungen auf einem Gleichgewicht oder auf Bewegung? Darauf wenigstens kann man meiner Ansicht nach die bestimmte Antwort geben, daß sie auf beiden beruhen. Die großen Ladungen, die man auf ungleichen Oberflächen ohne offenbare Reibung erhalten

kann – vorausgesetzt, daß eine tatsächliche Berührung über eine beträchtliche Fläche stattgefunden hat –, wie die vielfach, aber nicht übereinstimmend aufgestellten «elektrostatischen Reihen», deuten, allerdings ohne es zu beweisen, darauf hin, daß eine Gleichgewichterscheinung vorliegt. Andererseits werden die Ladungen, die man auf anscheinend gleichen Oberflächen erhalten kann – vorausgesetzt, daß eine asymmetrische Reibung erfolgt –, auf eine kinetische Erscheinung hinweisen. Daß man die Notwendigkeit einer Unterscheidung zwischen Gleichgewicht und kinetischer Erscheinung nicht beachtete, dürfte bisher die experimentellen Ergebnisse getrübt haben. Durch Reiben ungleicher Oberflächen – Reibung ist praktisch immer asymmetrisch – wurden nämlich gleichzeitig Gleichgewichts- und Bewegungserscheinungen hervorgerufen, was die Ergebnisse notgedrungen für veränderliche Versuchsbedingungen sehr

Linke Seite: Die von Adams im Jahre 1792 gebaute Maschine zur Erzeugung statischer Elektrizität. Die auf dem Glaszylinder durch Reibung mit dem darüber gelegten Tuch entstehende Ladung wurde auf den breiten, T-förmigen, isolierten Leiter mittels einer Reihe von scharfen Spitzen (auf dem Bilde nicht sichtbar) geleitet. Das hier abgebildete Instrument diente zu medizinischen Zwecken: der Arzt hielt die beiden Elektrisiergeräte am Glasstiel und ließ Ströme durch den auf dem isolierten Stuhl stehenden Patienten gehen. Mit einer sehr ähnlichen Maschine wurden telegraphische Übermittlungsversuche gemacht, indem man den Strom durch einen langen, hochisolierten Draht leitete, an dessen Ende ein Paar Holundermarkkugeln hing. Mit freundlicher Erlaubnis des Science Museum, London. British Crown Copyright.

Rechts: Die um 1844 von Sir William George Armstrong (1810–1900) konstruierte hydroelektrische Maschine. Die Elektrizität wurde hier durch einen Dampfstrahl erzeugt, d.h. durch die Wassertröpfchen, welche die Ladung mit sich tragen. Mit freundlicher Erlaubnis des Science Museum, London. British Crown Copyright.



empfindlich macht. Dies dürfte nicht nur die Widersprüche zwischen den Experimentatoren erklären (denen man gewöhnlich Verwendung verunreinigter Oberflächen vorwirft), sondern auch die Leichtigkeit begründen, mit der die Vorzeichen der Ladungen wechseln (wie wenn der Nullpunkt in der Skala der Ladungen keine besondere Bedeutung hätte, so daß bei zufälligen Ladungsänderungen das Vorzeichen wechselt).

2. Welches sind die geladenen Teilchen, die von einer Oberfläche zur andern wandern? Viele moderne Autoren haben ohne weiteres angenommen, es seien Elektronen, vermutlich weil ihnen die Bewegung von Elektronen in festen Körpern vertrauter ist, als diejenige von Ionen. Diese Annahme mag eine gewisse theoretische Rechtfertigung darin finden, daß bei beginnender Trennung der Oberfläche die Elektronen imstande sind, später als die Atomionen den Zwischen-

raum zu durchqueren, und zwar auf Grund des aus der Wellenmechanik bekannten «Tunneleffekts». Auf diese Weise haben sie sozusagen das letzte Wort. Andererseits deuten gewisse experimentelle Ergebnisse, wie die Wirkung von Azidität und Basizität der Oberflächen, darauf hin, daß Atomionen eine gewisse Rolle spielen dürften, was aber noch zu beweisen bleibt. Saure Oberflächen können vermutlich einige ihrer Wasserstoffionen verlieren und dadurch eine negative Ladung erhalten.

3. Wie gelangen Ladungsträger auf die Oberflächen und wann? Von den Isolatoren nimmt man an, daß sie keine beweglichen geladenen Teilchen enthalten, sonst wären sie keine Isolatoren. Immerhin können sich auf ihrer Oberfläche Elektronen oder Ionen befinden, die aus der Luft oder sonstigen Umgebung stammen, besonders wenn die Oberfläche eine Ladung trug und dadurch allenfalls Ionen mit entgegengesetzter Ladung aus der

Umgebung anzog. Sollten die Erscheinungen der Kontaktelektrizität von einer Ansammlung verirrter, zufällig hinzugekommener Ionen abhängig sein, so würde dies ihr unberechenbares Verhalten weitgehend erklären. Es sei auch daran erinnert, daß Reibung überraschend hohe örtliche Temperaturen erzeugt, wie Bowden und seine Mitarbeiter gezeigt haben. Diese Temperaturen können organische Isolatoren unter Bildung von Ionenfragmenten zersetzen.

4. Wieviele Teilchen sind zur Entstehung der beobachteten Wirkungen erforderlich? Die Antwort lautet: sehr wenige. Die höchste Flächendichte einer Ladung, die Medley unter besonderen Bedingungen beobachtete, betrug 500 elektrostatische Einheiten/cm<sup>2</sup> und erfordert zum Übergang eine elektrische Ladung auf 10'000 A<sup>2</sup>, eine Fläche, die viele Tausende von Atomen enthält. Ladungsdichten üblicher Stärke von etwa 5 el. stat. Einh./cm<sup>2</sup>, erfordern den Übergang eines Ions pro 1'000'000 Å<sup>2</sup>. So ist es nicht nötig, eine Massenwanderung von Elektronen oder Ionen anzunehmen, im Gegenteil, es genügt, daß ein Ion gelegentlich hie und da überspringt, um unsere Beobachtungen zu erklären.

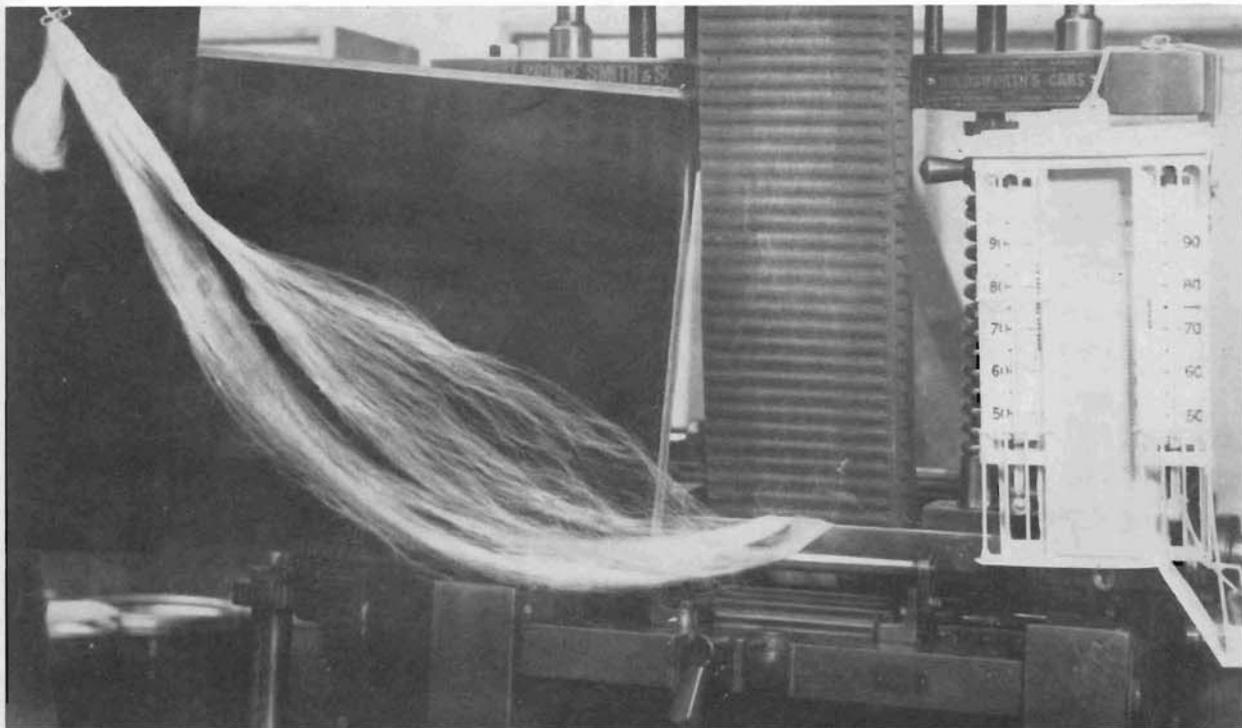
5. Wovon hängt es ab, welchen Weg die elektrisch geladenen Teilchen nehmen? Auf diese vielleicht wichtigste Frage können wir nicht eine, sondern viele Antworten geben, von denen jede einzelne wahrscheinlich in verschiedenen Fällen richtig ist. Vor vielen Jahren wies Helmholtz darauf hin, daß die eine der beiden Oberflächen eine größere Anziehung auf eine gegebene Ionennart (oder auf Elektronen, wie wir heute ergänzen wollen) ausüben kann als die andere, wie dies z.B. eintritt, wenn sich zwei Metalle berühren und der dadurch entstehende Elektronenübergang die für den Kontakt dieser beiden Metalle charakteristische Potentialdifferenz erzeugt. Knoblauch und andere Forscher vermuteten, daß sich die beiden Oberflächen wie eine winzige elektrische Batterie verhielten, dies vermutlich mit Hilfe eines dünnen Films von Feuchtigkeit, die sich auf die Oberflächen niedergeschlagen hatte. Shaw und Freundlich nahmen an, daß sich eine Doppelschicht von entgegengesetzten Ladungen auf der einen oder auf beiden Oberflächen befindet, bevor es zur Berührung der Flächen kommt. Durch die Bewegung der Flächen werde

ein kleiner Teil der oberen Schicht abgeschabt, wodurch die untere Schicht einen Überschuß an entgegengesetzter Ladung erhalte. Ich habe schon andernorts darauf hingewiesen, daß ein rein zahlenmäßiges Überwiegen von Ionen auf der einen Oberfläche eindeutig eine Wanderung von dieser zur andern Oberfläche hervorrufen werde (ein Effekt analog der elektromotorischen Kraft von metallischen Thermoelementen). Ich habe ebenfalls gezeigt, daß eine asymmetrische Reibung einen starken Temperaturunterschied zwischen den beiden Oberflächen erzeugt, was die Wanderung von Ionen oder Elektronen von der heißen zur kühlen Oberfläche verursachen könnte.

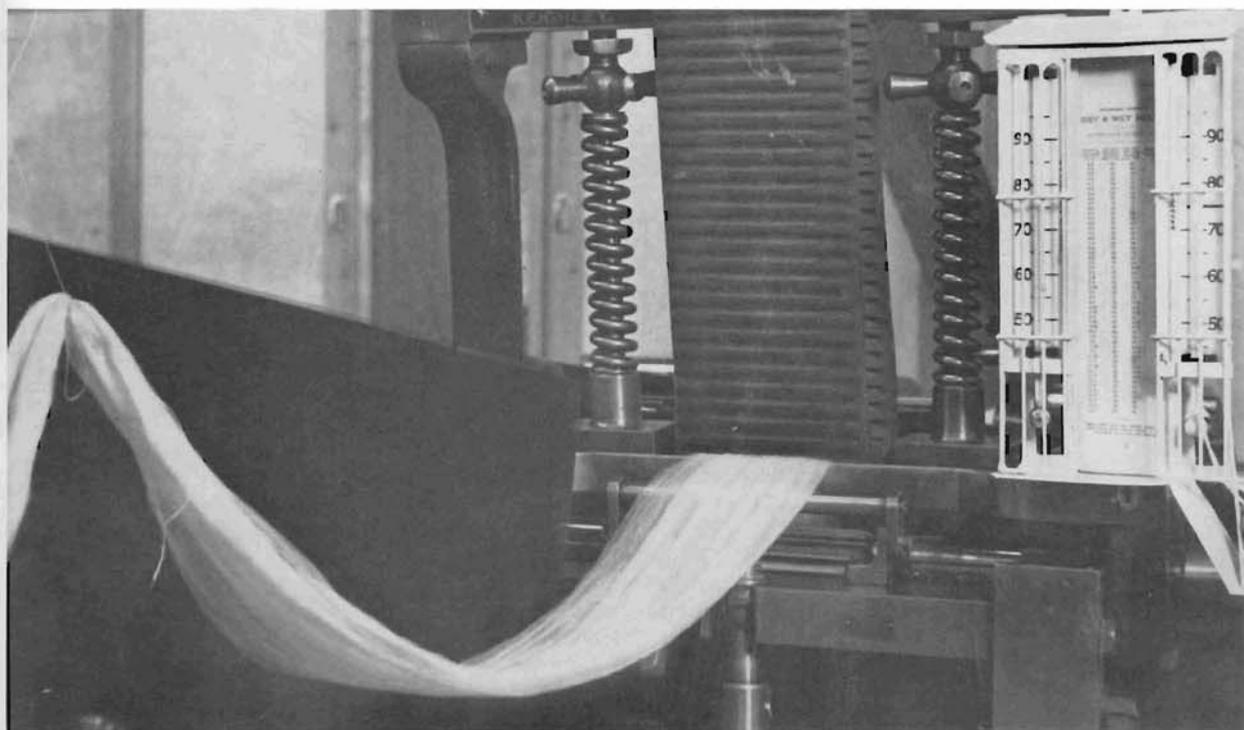
6. *Wie weit können die Teilchen über den Zwischenraum springen, wenn die Oberflächen sich trennen?* Harper legte dar, daß man auf Grund der Wellenmechanik so lange einen Übergang der Elektronen erwarten sollte, bis die Distanz zwischen den beiden Oberflächen ungefähr 25 Å erreicht, eine in der Atomphysik beträchtliche Entfernung (die Distanz zwischen benachbarten Atomen im Kochsalzkristall beträgt z.B. 2,8 Å). Die Bedeutung dieser Voraussage liegt darin, daß beim Vorhandensein beweglicher Elektronen nach unserer Theorie nicht eine absolute Berührung der Oberflächen, sondern schon die Verhältnisse bei ihrer Annäherung auf die Distanz von 25 Å zu berücksichtigen sind. Der Autor hat berechnet, daß der Übergang von Ionen bis zu so großen Abständen erfolgt, daß es eine Energie von etwa 1 Elektronenvolt brauchte, um ein Ion bis in die Mitte des Zwischenraumes zu bringen. Dieses Resultat durch die Größe des Zwischenraumes auszudrücken, mag schwierig sein, doch weist es einmal mehr darauf hin, daß ein beträchtlicher Zwischenraum selbst von Ionen übersprungen werden kann. Es ist beachtlich, daß die Ergebnisse beider Berechnungen von den speziellen Voraussetzungen ganz auffallend wenig beeinflusst werden: eine Verzehnfachung der angenommenen Zahl von Ionen pro Flächeneinheit beeinflusst das Resultat um nur 6%.

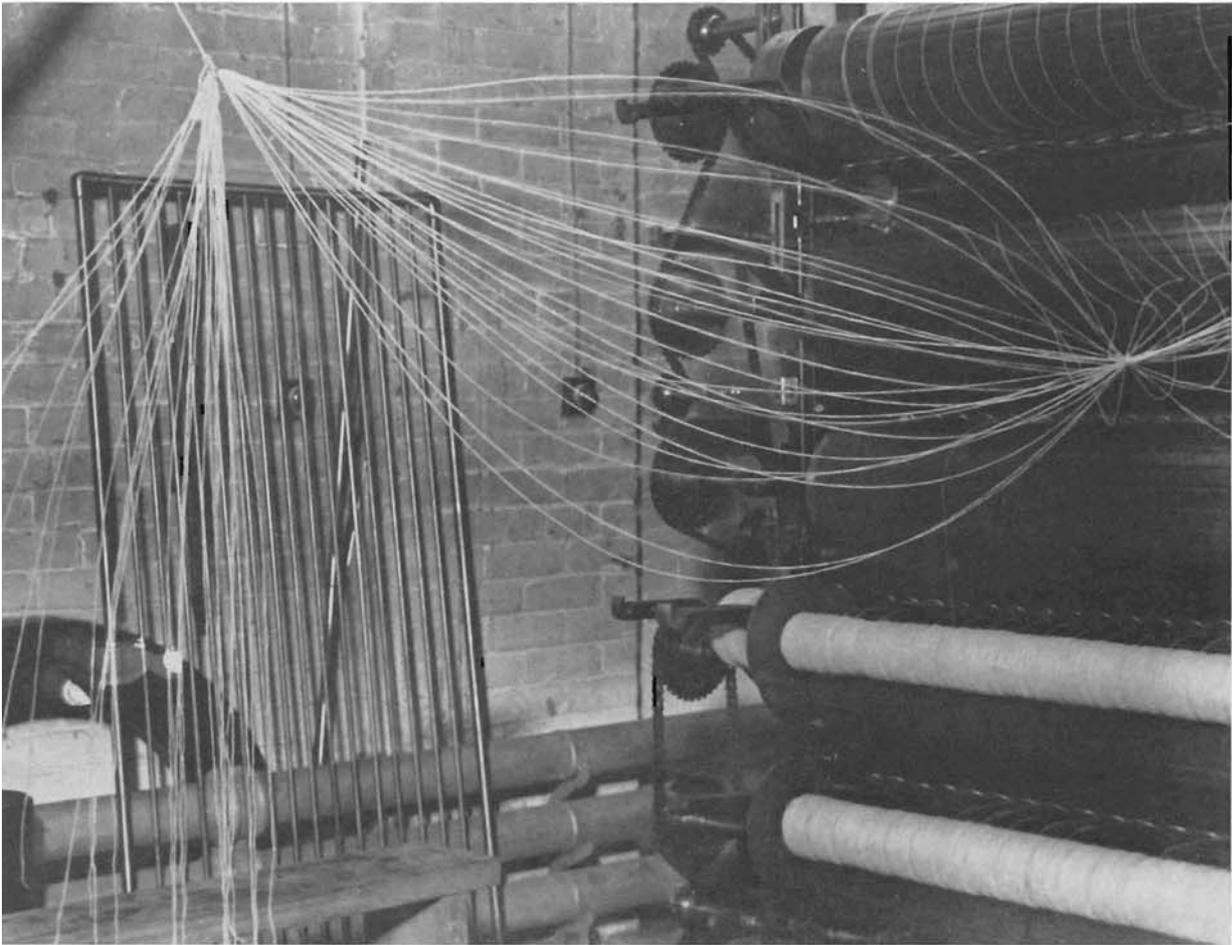
#### *Allgemeine Betrachtungen*

Zum Schluß schildern wir kurz und notwendigerweise stark vereinfacht das, was unserer Ansicht nach geschieht, wenn zwei Oberflächen – wovon mindestens



*Eine Strähne Wollfasern in geladenem (oben) und ungeladenem (unten) Zustand. Die Ladung ruft eine gegenseitige Abstoßung der Fasern hervor. Mit freundlicher Erlaubnis der Wool Research Association, Leeds.*

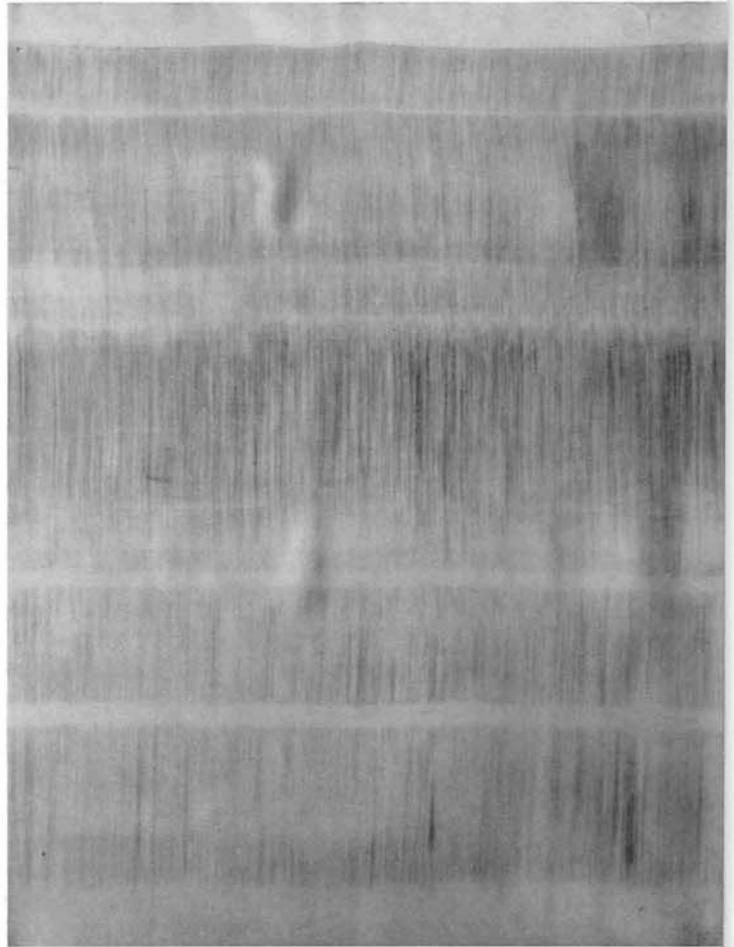




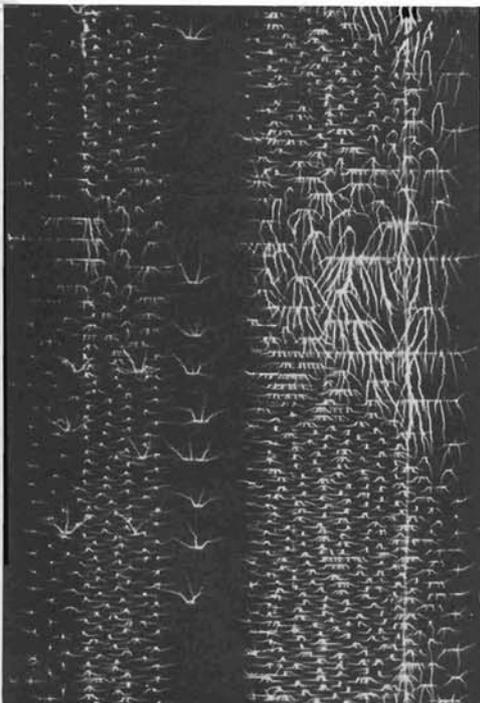
eine einem Isolator angehören muß – zusammenkommen, sich reiben und sich in Luft wieder trennen.

Zuerst etwas über die beiden Oberflächen vor ihrer Berührung. In molekularem Maßstab gesehen, sind sie nicht flach, und die für uns interessantesten Teile sind die «Bergspitzen», die mit der andern Oberfläche in Kontakt gelangen werden. Geladene Teilchen werden sich praktisch auf beiden Oberflächen befinden. Ist die eine der Oberflächen diejenige eines Leiters, so vermag dieser eine unbegrenzte Zahl von Elektronen zu liefern, die fähig sind, auf eine andere mit genügender Anziehungskraft ausgestattete Oberfläche überzugehen, d.h. wenn diese für einen Sprung nahe genug ist (innerhalb 25 Å nach Harper). Ist die Oberfläche diejenige eines elektronischen Halbleiters, so werden immer noch bewegliche Ionen, wenn auch in geringerer Zahl, vorhanden

sein. Handelt es sich um einen Isolator, so werden wenige oder gar keine beweglichen Elektronen oder Ionen anzutreffen sein; dafür werden sich Ionen verschiedener Art mehr oder weniger stark an verschiedene Teile der Oberfläche gebunden vorfinden. Diese Ionen stammen aus früheren Aufladungen der Oberfläche, das heißt aus der Luft, oder von anderen Oberflächen sind Ionen mit entgegengesetzter Ladung zur Neutralisation der Ladung angezogen worden. Schließlich müssen wir noch eine vierte Art von Oberfläche in Betracht ziehen, da sie in der Industrie äußerst häufig anzutreffen ist, während über ihr elektrisches Verhalten nur wenig Zusammenhängendes bekannt ist. Gemeint sind die polaren Isolatoren oder ionischen Halbleiter, oder wie man sie nennen will. Cellulose- und Proteinstoffe und viele synthetische Polymere gehören zu ihnen. Diese Oberflächen absorbieren Wasser,



*Vorangehende Seite: Ein Bündel elektrostatisch geladener Garne, die sich gegenseitig abstoßen, aber von der Walze im Hintergrund angezogen werden. Mit freundlicher Erlaubnis der Wool Research Association, Leeds.*



*Oben: Nebelstecken (fog-marking) auf einem Stoff, dessen Kette aus Celluloseacetat besteht. Die Garne werden durch Reibung an verschiedenen Teilen des Webstuhls aufgeladen und ziehen, wenn sie die Nacht über in diesem Zustand auf dem Webstuhl bleiben, winzige Schmutzpartikel aus der Luft an. Mit freundlicher Erlaubnis der British Cotton Industry Research Association, Manchester.*

*Nebenstehende Abbildung: Photographischer Film mit Spuren elektrostatischer Entladungen. Beim Gleiten eines Films über Rollen können kleine Entladungen erfolgen, die den Film unbrauchbar machen. Mit freundlicher Erlaubnis der British Cotton Industry Research Association, Manchester.*

und ihre elektrische Leitfähigkeit hängt in sehr starkem Masse von dieser Wasserabsorption ab. Niemand scheint genau zu wissen, wie die Leitung erfolgt, doch sind dafür wohl eher Ionen als Elektronen verantwortlich. Wesentlich von unserem Standpunkt aus ist die Tatsache, daß wahrscheinlich zahlreiche Ionen von den polaren oder polarisierbaren Gruppen angezogen werden. Einige dieser Oberflächen, z.B. Proteine, werden sogar eigene Ionen erzeugen, so daß sich eine größere Zahl, aber weniger verschiedenartige Ionen ansammeln werden als auf den nichtpolaren Isolatoren.

Bringt man nun die Oberflächen zusammen, so wird über den kleinen Flächen, die sich wirklich berühren, eine Verteilung von Ionen eintreten, die entsprechend den von den beiden Oberflächen ausgehenden Anziehungskräften beeinflusst wird. Weist die eine Oberfläche eine bedeutend größere Anzahl Teilchen bestimmter Art auf, so gehen diese zum Teil auf die andere Oberfläche über, auch wenn die erste eine größere Anziehung auf sie ausübt. Dieser Austausch von Teilchen wird in der Regel darauf hinauslaufen, daß ein effektiver Ladungsübergang stattfindet, denn es dürfte nur gelegentlich vorkommen, daß alles im Gleichgewicht ist und die Oberflächen neutral bleiben. Tritt eine Ladungstrennung ein, so wird das elektrische Feld zwischen den Ladungen einer weiteren Trennung entgegenstehen.

Nach Bowden und seinen Schülern ist die gesamte wirkliche Berührungsfläche für ein gegebenes Substanzpaar dem Gesamtdruck zwischen den Oberflächen proportional. Deshalb dürfte man erwarten, daß die gesamte Ladungstrennung der aufgewendeten Kraft proportional ist, was durch einige experimentelle Tatsachen bestätigt wird.

Reibt man nun die Oberflächen aneinander, so werden sich ihre erhabenen Stellen an den flacheren der Gegenfläche reiben und sich dadurch erhitzen. Infolge der Wärmebewegung werden Ionen und Elektronen danach streben, die heißen Stellen schneller zu verlassen, als sich die Teilchen von den kühleren Stellen in der entgegengesetzten Richtung bewegen. So wird eine allgemeine Wanderung von den heißen Stellen weg eintreten. Sind die beweglichen Teilchen zur Hauptsache gleichnamig, so wird eine zusätzliche Ladungstrennung eintreten, welche in

gleicher oder entgegengesetzter Richtung wie bei der ersten Berührung erfolgen kann. Sind aber die Richtungen entgegengesetzt, so kann eine auf Reibung zurückzuführende Umkehr der Ladung erfolgen, eine Erscheinung, der wir manchmal in der Textilindustrie begegnen.

Trennen wir nun die Oberflächen, – denn nur so kann man normalerweise die Ladungen beobachten. Die Elektronen wenigstens werden so lange zur andern Oberfläche übergehen, bis die Distanz von 25 Å erreicht ist, worauf ein Stillstand eintritt. Dies wird aber oft noch nicht der letzte Übergang von Ladungen über den Zwischenraum sein, denn in einem späteren Stadium tritt ein anderer Mechanismus in Funktion. Entsprechend einem wohlbekannten elektrostatischen Lehrsatz nimmt das Feld zwischen den geladenen Oberflächen so lange nicht ab, als ihre Distanz, verglichen mit ihren Ausmaßen, immer noch klein bleibt. Nun haben wir gesehen, daß keine große Zahl geladener Teilchen erforderlich ist, um ein Feld zu erzeugen, das eine Entladung in Luft hervorzurufen vermag. Dies kann jedoch nicht eintreten, solange die Oberflächen sehr nahe beieinander liegen. Die Ionen brauchen nämlich eine gewisse «Anlaufstrecke», um eine Geschwindigkeit zu erreichen, die zur Erzeugung neuer Ionen für die Entladung genügt. Sobald sich jedoch die Oberflächen um einen ansehnlichen Bruchteil eines Millimeters getrennt haben, tritt oft eine Entladung ein. Dies bewirkt das bekannte Knistern beim Wegziehen einer trockenen isolierenden Oberfläche über eine andere (z.B. Ausziehen eines wollenen Pullovers). Durch die Entladungen werden die Ladungen auf den Oberflächen herabgesetzt, bis sie ein Minimum erreichen, das zur Entladung nicht mehr genügt. Daher rührt es, daß die nach der Trennung auf den Oberflächen vorgefundenen Ladungen oft – wenn nicht in der Regel – nur einen kleinen Bruchteil der ursprünglichen Ladungen darstellen.

In den obigen Ausführungen haben wir uns absichtlich auf einige der einfacheren Aspekte beschränkt. In besonderen Fällen dürften viele weitere Faktoren, auf die hingewiesen worden ist, einen Einfluß auf die Ladungstrennung ausüben. Es ist kein Wunder, daß es schwer fällt, irgendwelche Voraussagen über elektrostatische Erscheinungen zu machen. P. S. H. Henry