©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Über
elektrische Kraftübertragung
mittels Mehr-Phasenstrom.

Von

Max Jüllig,
dipl. Ingenieur, Docent an der k. k. technischen Hochschule in Wien,
Referent der k. k. Eisenbahn-Betriebsdirection Wien.

Vortrag, gehalten den 17. Februar 1892.

(Mit Experimenten.)

Mit 24 Abbildungen im Texte.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Die elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt a. M. hat durch die Vorführung eines großartigen Experimentes aus dem Gebiete der elektrischen Kraftübertragung bei allen Freunden der Wissenschaft und Technik nicht geringes Aufsehen erregt.

Es wurden auf eine Distanz von 176 *km* über 100 Pferdekräfte übertragen, und zwar von Lauffen im Neckarthale bis zum Ausstellungsplatze in Frankfurt a. M.

Die motorische Kraft wurde in Lauffen einer durch die Wasserkraft des Neckar betriebenen Turbinenanlage entnommen und mittels eigenartiger Maschinen zur Erzeugung elektrischer Wechselströme verwendet, welche durch drei Drahtleitungen bis nach Frankfurt a. M. geführt und dort zu Beleuchtungszwecken, sowie zum Betrieb von Motoren verwendet wurden. Die durch eine Wechselstrommaschine in Lauffen erzeugten Ströme hatten geringe Spannung und große Intensität. Dieselben wurden an Ort und Stelle in Hochspannungsströme von geringer Intensität transformiert und als solche bis Frankfurt fortgeleitet, wo eine zweite Transformation im umgekehrten Sinne stattfand.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Die Doppeltransformation von Wechselströmen bezweckt, elektrische Energie in ökonomischer Weise auf große Entfernungen fortzuleiten, und steht bei vielen Elektricitätscentralen seit Jahren in Verwendung. Um die Vortheile der Energieübertragung mit Wechselströmen richtig zu würdigen, wird es nothwendig sein, zunächst auf den Zusammenhang zwischen mechanischen und elektrischen Effecten näher einzugehen.

Jeder elektrische Strom besitzt eine bestimmte Arbeitsfähigkeit, die sich entweder als Wärmewirkung oder in irgend einer anderen Form der Energie (Licht-, chemische oder mechanische Wirkung) äußert.

Betrachten wir ein Stück ab (Fig. 1) eines beliebigen Stromkreises vom Widerstande W (gemessen in Ohm), welches von einem elektrischen Strome von der Intensität I (gemessen in Ampères) durchflossen ist. Die in demselben auftretende Energie zeigt sich als Wärme. Bezeichnen wir dieselbe mit A, so ist nach dem Joule'schen Gesetze die pro Secunde entwickelte Wärmemenge $A = 0{\cdot}00024\, I^2\, W$ Kilogramm-Calorieen. Eine Kilogramm-Calorie ist jene Wärmemenge, die im Stande ist, ein Kilo chemisch reinen Wassers von 0° auf 1° C. zu erwärmen.

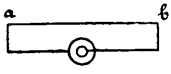

Fig. 1.

Ein anderer Ausdruck für die im Drahtstück ab entwickelte Energie lässt sich durch Einführung des Begriffes „Potential" gewinnen und soll dieser Begriff an einer Analogie aus dem Gebiete der Hydraulik erläutert werden.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Aus dem Gefäße *A* (Fig. 2) fließt Wasser durch das Rohr *m n* ab. Die Wassersäule *a b* ist in Bewegung und zwar deshalb, weil der Flüssigkeitsdruck per Flächeneinheit im Punkte *a* größer ist als jener im Punkte *b*. Wäre der Druck bei *a* gleich jenem bei *b*, so würde sich die Wassersäule *a b* nicht bewegen. Man kann sich leicht überzeugen, dass in der That der hydrostatische Druck im Punkte *a* größer ist als im Punkte *b*. Befestigt man zu diesem Zwecke bei *a* und *b* je ein verticales Röhr-

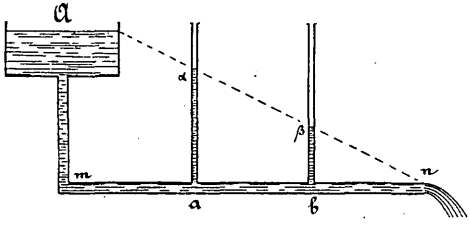

Fig. 2.

chen, so steigt das Wasser in jenem bei *a* bis α, dagegen beim zweiten Röhrchen nur bis β.

Analoge Verhältnisse finden wir in einem Stromleiterstück *a b* (Fig. 1). Der elektrische Strom fließt von *a* nach *b*. An Stelle der Wassermenge tritt die Elektricitätsmenge, welche in der Zeiteinheit (Secunde) den Leitungsquerschnitt durchfließt. Dies ist die Stromstärke *I*. Den Begriff des hydrostatischen Druckes haben wir durch jenen des elektrischen Potentials zu ersetzen. Dasselbe muss in *a* größer sein als in *b*, damit der Strom in der Richtung *a b* zustande

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

kommt. Somit ist die unter sonst gleichen Umständen resultierende Stromstärke I um so größer, je größer die Differenz der in den Punkten a und b gemessenen Potentiale (Potentialdifferenz) ist. Man nennt diese Differenz auch die zwischen a und b wirksame elektromotorische Kraft. Wir bezeichnen sie mit E. Nach dem Ohm'schen Gesetze ist: $I = \frac{E}{W}$ oder $IW = E$. Schreiben wir die Gleichung I in der Form

$$A = 0{\cdot}00024\ I\,W \times I$$

und setzen E statt $I\,W$, so ist $A = 0{\cdot}00024\ E\,I$ Calorien pro Secunde, d. h.: In jedem Stück eines Stromleiters ist die entwickelte Wärmemenge oder die in andere Formen übertragene elektrische Energie dem Producte aus Stromintensität und Potentialdifferenz direct proportional.

Nachdem Wärme und mechanische Arbeit äquivalent sind, lässt sich die Arbeitsfähigkeit eines Stromes $a\,b$ auch in Pferdekräften pro Secunde bestimmen. Dieselbe ist $L = \frac{I\,E}{736}$, d. h.: Wenn es möglich wäre, die gesammte elektrische Energie eines Stromleiters, der von einem Strom von der Intensität I durchflossen und an dessen Enden eine Potentialdifferenz $= E$ beobachtet wird, in mechanische Arbeit umzuwandeln, so würde diese, in Pferdekräften pro Secunde gemessen,

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

gleich sein dem Producte aus Stromstärke und Potentialdifferenz dividiert durch 736.

Um eine Pferdekraft zu leisten, müsste das Product $IE = 736$ sein. Dieses Product lässt sich durch Combination sehr verschiedenartiger Werte von I und E bilden, z. B.:

$I = 1;$	$E = 736;$	$IE = 736$
$I = 2;$	$E = 368;$	$IE = 736$
$I = 4;$	$E = 184;$	$IE = 736$
$I = 8;$	$E = 92;$	$IE = 736$
$I = 16;$	$E = 46;$	$IE = 736$
$I = 32;$	$E = 23;$	$IE = 736$

u. s. w.

Um für den speciellen Fall der Übertragung elektrischer Energie auf große Entfernungen die richtige Auswahl der Stromstärke und Spannung zu treffen, betrachten wir die schematische Darstellung Fig. 3.

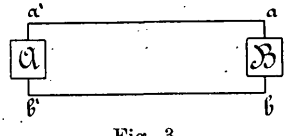

Fig. 3.

Der den Elektromotor B durchfließende Strom ab habe die Arbeit von 100 Pferdekräften zu leisten, somit ist $IE = 736 \times 100 = 73600$. Soll die viele Meilen weit geführte Stromzuleitung nicht unerschwinglich theuer werden, so darf die Stromstärke nur sehr gering gewählt werden. Bei $I = 4$ Ampère Stromstärke würde es genügen, Kupferleitungen von 4 *mm* Dicke anzuwenden, die sich noch nicht merklich erwärmen

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

und infolge dessen auch keine bedeutenden Energieverluste[1]) bedingen.

Dagegen müsste man die exorbitant hohe Potentialdifferenz von 18.400 Volt zwischen den Punkten *a* und *b* erzeugen, zu welchem Zwecke an den Klemmen *a′ b′* des Elektro-Generators *A* eine noch höhere Spannungsdifferenz nothwendig wäre.

Es ist nun ganz unmöglich, mit einer Dynamomaschine Potentialdifferenzen von so kolossaler Höhe zu erzielen, da wir kein festes Isoliermaterial kennen, das bei derartigen Spannungen ein Überspringen elektrischer Funken zwischen den Drahtwindungen des rotierenden Ankers verhindern könnte.

Auch die Verwendung mehrerer Dynamos in Serienschaltung ist praktisch undurchführbar. Man müsste 8—10 Dynamos nebeneinander aufstellen, gegen den Boden sorgfältig isolieren und gleichzeitig betreiben. Eine solche Anlage braucht sehr viel Raum, kommt sehr hoch und ist für das Aufsichtspersonal im höchsten Grade lebensgefährlich.

Es wird deshalb bei Gleichstromkraftübertragungen nur selten mit Potentialdifferenzen von mehr als 2000 Volt gearbeitet.

Weit höhere Potentialdifferenzen lassen sich mit transformierten Wechselströmen erzielen.

Zur Charakterisierung des Wechselstromes diene Fig. 4. Auf der Achse *ox* werde die Zeit als Abcisse

---

[1]) 0·03 Pferdekräfte pro Kilometer Leitung.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

aufgetragen. Die parallel zu $o\,y$ aufgetragenen Ordinaten 1, 2, 3 . . . 12 bedeuten Stromstärken. Die Stromstärke wächst allmälig bis zu ihrem Maximum (Ordinate 3) an und nimmt dann wieder bis auf Null ab. Nun wechselt der Strom seine Richtung und wächst in einer der früheren entgegengesetzten Richtung bis zu einem (negativen) Maximum (Ordinate 9), um sodann wieder bis zur Intensität Null herabzusinken. Die Stromwechsel schließen sich in ununterbrochener

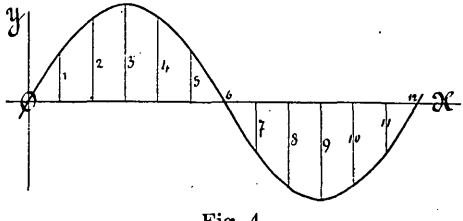

Fig. 4.

Reihenfolge aneinander und erfolgen sehr rasch, so zwar, dass bei manchen Maschinen bis zu 300 Stromwellen in der Secunde entstehen. Die Länge 0—12 in Fig. 1 entspricht somit einem sehr kleinen Bruchtheil einer Secunde. Um die Arbeitsfähigkeit eines Stromleiters $a\,b$, der von einem Wechselstrom durchflossen wird, zu bestimmen, können wir ein ähnliches Verfahren anwenden wie beim Gleichstrom. Allerdings ist beim Wechselstrom weder die Stromstärke, noch die Potentialdifferenz an den Enden a und b constant. Beide variieren nach dem Gesetze einer Wellen-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

linie.[1]) Es lässt sich jedoch leicht die Stromstärke und Potentialdifferenz eines Gleichstromes angeben, welcher die gleiche Arbeitsfähigkeit hat wie ein Wechselstrom. Zu diesem Zwecke führt man Mittelwerte der variierenden Stromstärke und Potentialdifferenz ein, und es lässt sich durch Rechnung nachweisen, dass ein Gleichstrom, dessen Intensität 0·7 der Maximalintensität des Wechselstromes beträgt, bei sonst gleichen Verhältnissen eine mit jener des Wechselstromes identische Arbeitsfähigkeit besitzt. Ebenso kann man an Stelle der variierenden Potentialdifferenz an den Punkten a und b einen Mittel-

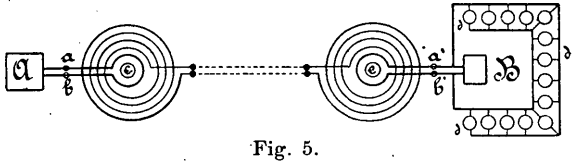

Fig. 5.

wert setzen, der ebenfalls 0·7 der größten Potentialdifferenz beträgt. Das Product beider Mittelwerte, dividiert durch 736, gibt mit großer Annäherung die Arbeitsfähigkeit des Wechselstromes in Pferdekräften. Die Transformation der Wechselströme geschieht durch Inductionsapparate, deren Bau jenem der Ruhmkorffschen Funkeninductoren sehr ähnlich ist.

In Fig. 5 ist das Schema einer Doppeltransformation dargestellt. Die Wechselstrommaschine A erzeugt Ströme von geringer Potentialdifferenz und großer

[1]) $y = a \sin bx = a \sin \frac{2\pi t}{T}$.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Stromintensität. Ihre Bedienung ist somit vollkommen gefahrlos. Diese Ströme durchfließen eine Spule $a\,b$ mit wenigen Windungen (primäre Spule), die den Eisenkern c umgeben. In der Fig. 5 wurde nur eine einzige primäre Windung gezeichnet. Die Mittelwerte der Stromstärke und Potentialdifferenz in der primären Spule seien I und e. Über die erste Spule ist eine zweite mit sehr vielen Windungen (in Fig. 5 sind deren nur vier gezeichnet) geschoben und von der primären Spule sorgfältig isoliert. Durch die Inductionswirkung der primären Spule und des Eisenkernes entstehen in der zweiten (secundären) Spule ebenfalls Wechselströme, deren Stromstärke und Potentialdifferenz wir mit i und E bezeichnen, Es zeigt sich nun, dass zwischen den Producten $I\,e$ und $E\,i$ nur ein sehr geringer Unterschied besteht. Die Arbeitsfähigkeit $\frac{I\,e}{736}$ ist zum größten Theil in der veränderten Form $\frac{i\,E}{736}$ wieder gewonnen, und der Verlust beträgt bei guten Transformatoren nur 5 Percent. Dabei ist aber die Potentialdifferenz bedeutend gewachsen, dagegen hat die Stromintensität abgenommen, und der Strom ist somit geeignet, eine Fernleitung ohne allzugroße Energieverluste zu durchfließen. Das Verhältnis von e und E ist mit großer Annäherung gleich jenem der Windungszahlen der primären und secundären Spule. Für das in der Fig. 5 dargestellte Beispiel wird $E \doteq 4e$, $i \doteq \frac{1}{4} I$[1]) sein.

[1]) $\doteq$ soll heißen: näherungsweise gleich.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Die Fernleitungsströme werden im zweiten Inductionsapparat rücktransformiert und können gefahrlos in bewohnte Räume eingeführt werden, wo dieselben den Zwecken der Beleuchtung und Arbeitsleistung dienen. In Fig. 5 ist die Stromverzweigung für den Betrieb eines Motors *B* und einer Glühlampenreihe *d d d* schematisch dargestellt. Die Verwendung des Wechselstromes zu Glüh- und Bogenlichtbeleuchtung bringt keinerlei Schwierigkeiten mit sich. Dagegen ist die Construction vollkommen entsprechender Wechselstrommotoren ein Problem, dessen Lösungen eine noch keineswegs abgeschlossene Reihe bilden. Das Princip der älteren Wechselstrommotoren wird aus Fig. 6 klar werden. *A B* ist ein Elektromagnet, dessen Schenkel von Wechselströmen umflossen werden. Zwischen den Polen ist eine Magnetnadel an einer Achse drehbar. Durch den Wechselstrom entstehen bei *A* und *B* rasch abwechselnde Magnetpole, welche die Magnetnadel beeinflussen. Die Bewegung der letzteren soll in vier Stadien dargestellt werden.

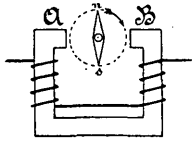

Fig. 6.

1. Stadium: Die Stromintensität ist ein Maximum, die magnetischen Quantitäten in den Polen des Elektromagnetes seien *N* und *S* (Fig. 7, I). Die Nadel wird im Sinne des Uhrzeigers bewegt, da sich gleichnamige Pole abstoßen und ungleichnamige anziehen.

2. Stadium: Die Stromstärke hat abgenommen,

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

die magnetischen Quantitäten in den Polen sind geringer geworden, wirken jedoch noch immer in solchem Sinne auf die Nadel ein, dass dieselbe ihre Drehbewegung im Sinne des Uhrzeigers fortsetzt (Fig. 7, II).

3. Stadium. Die Stromstärke des Wechselstromes ist Null. Die Magnetismen der fixen Pole sind nahezu verschwunden. Die Nadel passiert infolge des Beharrungsvermögens die Verbindungslinie der Elektromagnetpole (Fig. 7, III).

4. Stadium. Der Wechselstrom hat seine Richtung umgekehrt. Aus dem früheren Nordpol des Elektro-

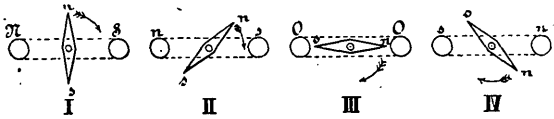

Fig. 7.

magnets ist ein Südpol geworden und vice versa, die Nadel dreht sich weiter (Fig. 7, IV). In gleicher Art kann man die Bewegung der Nadel weiter verfolgen und ist die Nadelachse im Stande, durch ihre Drehung mechanische Arbeit zu verrichten. Ähnliche Bewegungserscheinungen lassen sich auch mit großen Maschinen erzeugen. Die Magnetnadel ist dann durch einen kräftigen Elektromagnet zu ersetzen und kann die Wirkung der Maschine durch Anbringung von 4, 6, 8 und mehr fixen und beweglichen Polen gesteigert werden. An der Achse des drehbaren Elektromagnets wird die Riemenscheibe zur Übertragung mechanischer Effecte

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

befestigt. Maschinen dieser Art leiden aber an einem großen Übelstande. Sie bleiben bei Überlastung stehen und müssen unter Aufwendung besonderer Maßregeln wieder in Gang gesetzt werden.

In den beschriebenen vier Stadien wird vorausgesetzt, dass die Nadel in jenem Zeitraume eine ganze Umdrehung macht, in welchem eine ganze Stromwelle 0—12, Fig. 4, entsteht. Zwischen der Wellenbewegung des Stromes und der Drehbewegung der Nadel muss Synchronismus herrschen. Nehmen wir an, die Achse der Nadel werde so kräftig gebremst, dass die Nadel im Stadium 4 des Wechselstromes erst in jene Lage gekommen ist, welche sie schon im Stadium 2 hätte einnehmen sollen (Fig. 8), dann würden sich gleichartige Pole einander nähern und müsste durch deren Abstoßung die Bewegung gehemmt werden.

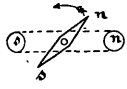

Fig. 8.

Diesem Übelstande sind die neueren (asynchronen) Motoren — von denen auch mehrere gelegentlich der Frankfurter Ausstellung functionierten — nicht unterworfen.

Zum Verständnisse der Einrichtung derselben ist es nothwendig, einige historische Daten heranzuziehen.

Schon 1885 hat Professor Galileo Ferraris in Turin gezeigt, dass man durch Combination von zwei Wechselströmen mit constanter Phasendifferenz ein magnetisches Drehfeld erzeugen könne.

Zunächst sollen die Begriffe 1. magnetisches Feld

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

und Drehfeld und 2. Phasendifferenz von zwei Wellenströmen erläutert werden.

Jeder Raum, in dem magnetische Kräfte wirken, wird als magnetisches Feld bezeichnet. Magnetische Felder von großer Intensität entstehen immer zwischen den Polen kräftiger Hufeisenmagnete.

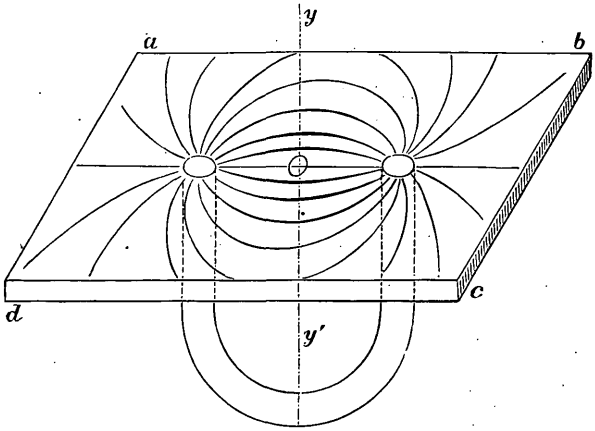

Fig. 9.

Bringt man (Fig. 9) unter einen über dem Rahmen *a b c d* gespannten Bogen Papier, der mit Eisenfeilspäne bestreut ist, einen kräftigen Hufeisenmagnet und erschüttert die Papierfläche durch leises Klopfen, so ordnen sich die Eisenfeilspäne in sanft gekrümmten Linien aneinander, welche als Kraftlinien bezeichnet werden. Lassen wir den Magnet um eine Achse *o y* rotieren, so rotiert auch das magnetische Feld und wir

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

nennen dasselbe dann ein magnetisches Drehfeld. Schon Arago hat gezeigt, dass durch rotierende Kupfermassen ein Magnet in drehende Bewegung gesetzt werden kann und nannte diese Erscheinung Rotationsmagnetismus.

Umgekehrt gelingt es auch durch einen rotierenden Magnet eine leicht bewegliche Kupfermassse in Umdrehung zu versetzen.[1]) Hängt man eine kupferne Kugel K (Fig. 10) an einem dünen Faden f auf und lässt die Magnetpole NS eines um die Achse yy' sich drehenden Magnetes NS um dieselbe kreisen, so beginnt die Kugel sich im gleichen Sinne mit der Rotation des Magnetes zu drehen und ist bestrebt, mit diesem die gleiche Rotationsgeschwindigkeit zu erreichen. Um störende Luftströmungen, die ebenfalls eine kreisende Bewegung der Kugel hervorrufen könnten, abzuhalten, ist dieselbe mit einem Schutzgläschen $a\,b\,c\,d$ umgeben. Das Experiment zeigt, dass eine Kupfermasse durch ein rotierendes magnetisches Feld in Drehung versetzt wird. Eine ähnliche Erscheinung hat Ferraris mittels zweier Wechselströme hervorgerufen.

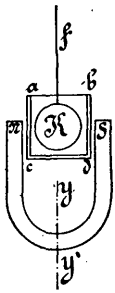

Fig. 10.

Der Verlauf der letzteren ist in Fig. 11 durch die Curven $a\,c$ und $b\,d$ dargestellt.

Die Stromintensitäten sind gleich den verticalen Ordinaten der in continuierlichen und gestrichelten

---

[1]) Das Experiment wird gezeigt.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Linien gezeichneten Wellencurven. Wenn die Stromstärke des einen Wechselstromes ihr positives oder

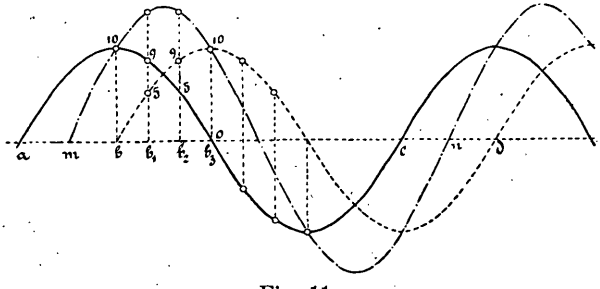

Fig. 11.

negatives Maximum erreicht hat, ist jene des zweiten Wellenstromes gleich Null. Wir sagen, zwei Wechselströme der vorliegenden Art haben eine Phasendifferenz von einer Viertelwellenlänge.[1]) Ferraris combinierte die Einwirkung von zwei Wechselströmen dieser Art auf eine bewegliche Kupfermasse in folgender Art: Der eine Wechselstrom wird durch eine oder mehrere Windungen *m n* geleitet, welche die Kupferkugel *K* (Fig. 12) um-

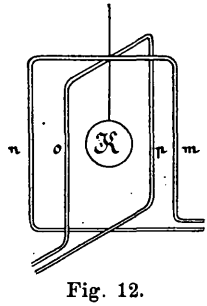

Fig. 12.

---

[1]) Im allgemeinen kann die Phasendifferenz gleichartiger Wellenströme durch einen Bruch ausgedrückt werden, dessen Zähler die Länge $\overline{a\,b}$ (Fig. 11) und dessen Nenner $\overline{a\,c}$ ist.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

geben. Der zweite Wechselstrom führt durch die Windung (oder die Windungen) *o p*, welche in einer auf der Windungsebene *m n* senkrecht stehenden Ebene liegen. Die Kugel beginnt zu rotieren und steigert ihre Geschwindigkeit bis zu einem bestimmten Maximum.[1])

Wir sind berechtigt, bei gleichen Wirkungen auch gleiche Ursachen zu vermuthen. Im vorliegenden Falle ist also die Annahme zulässig, dass die Rotation der Kugel im Ferraris'schen Versuche gerade so durch die Drehung eines magnetischen Feldes hervorgerufen wird, wie dies bei dem an Fig. 10 erläuterten Versuche der Fall war. Ein Beweis der Richtigkeit

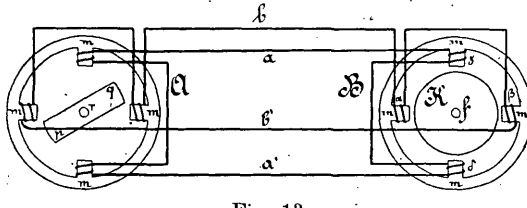

Fig. 13.

dieser Anschauung soll durch die Betrachtung eines Elektromotors angebahnt werden, dessen Erfindung wir der Anregung Ferraris' und dem praktischen Geschicke des genialen amerikanischen Elektrikers Tesla verdanken. Die Einrichtung des Tesla-Motors ist in Fig. 13 schematisch dargestellt. Mit Hilfe des Doppelinductors *A* werden zwei Wellenströme mit der Phasen-

[1]) Das Experiment wird gezeigt.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

differenz von $^1/_4$ Wellenlänge erzeugt und durch zwei Leitungsschleifen $a\,a'$ und $b\,b'$ dem Motor B zugeführt. Inductor und Motor bestehen aus je einem fixen Eisenring mit vier Polansätzen m, über welche Drahtwindungen gelegt sind. $p\,q$ ist ein um die zur Zeichnungsfläche senkrechte Achse r drehbarer kräftiger Elektromagnet, der durch eine Dampfmaschine, Turbine oder sonst irgend einen Motor in rasche Rotation versetzt wird. Bei diesem Vorgange entstehen in den Leitungsschleifen $a\,a'$ und $b\,b'$ Wechselströme, welche dem Dia-

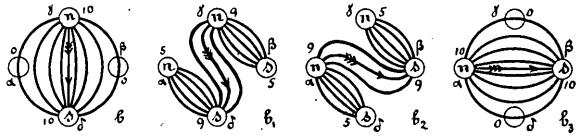

Fig. 14.

gramm Fig. 11 entsprechen und in den Elektromagneten m des Motors B Magnetismen von rasch wechselnder Intensität und Art *(N, S)* erzeugen. Jeder Magnetpol des Motors B durchläuft der Reihe nach jene Stadien, die bereits in Fig. 7 angedeutet wurden. Wir haben es nun aber mit zwei variierenden magnetischen Feldern α—β und γ—δ zu thun, durch deren Combination ein neues, ganz eigenartiges und ebenfalls continuierlich variierendes Feld entsteht. Die Constitution desselben zeigt Fig. 14 in mehreren Diagrammen.

Die in der Leitung a (Fig. 13) fließende Stromwelle sei mit der Stromwelle $a\,c$ in Fig. 11 identisch,

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

desgleichen die Stromwelle der Leitung b (Fig. 13) mit $b\ d$ in Fig. 11. Es sollen nun die den Ordinaten b, b_1, b_2 und b_3 in Fig. 11 entsprechenden vier Stadien dargestellt werden. Dabei wird angenommen, dass Stromstärken, die durch nach aufwärts gehende Ordinaten dargestellt werden, in α und γ (Fig. 13) Nordpole, in β und δ Südpole erzeugen. Die an den Wellencurven in Fig. 11 stehenden kleinen Ziffern geben ein Zahlenbild der relativen Stromstärken. So z. B. hat der Wellenstrom $a\ c$ bei Ordinate b die Intensität 10, bei b_1 die Intensität 9 [1]), bei Ordinate b_2 die Intensität 5, bei Ordinate b_3 die Intensität Null u. s. w.

Die in den Elektromagnetpolen α, β, γ, δ erzeugten Magnetismen sind den Stromintensitäten nahezu proportional und bedeuten die kleinen Ziffern in den Diagrammen Fig. 14 die relativen Intensitäten der Magnetpole. Den vier Ordinaten b, b_1, b_2, b_3 der Fig. 11 entsprechen vier Stadien der magnetischen Felder, welche in Fig. 14 durch die entsprechenden Kraftlinien dargestellt sind. Stadium b zeigt ein einfaches magnetisches Feld ähnlich dem in Fig. 9 dargestellten. Im Stadium b_1 kommen eigentlich drei magnetische Felder zum Vorschein: $\alpha\ \delta$, $\gamma\ \beta$ und $\gamma\ \delta$, von denen das letztere S-förmig gekrümmte Kraftlinien besitzt. Eine ähnliche Constitution besitzt das magnetische Feld im Stadium b_2. Das magnetische Feld b_3 ist der Gestalt nach congruent mit dem Felde b, der Richtung nach jedoch um 90^0 gegen

---

[1]) Genau genommen 8·6603.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

das erstere verdreht. Von einem zum anderen Stadium findet ein continuierlicher Übergang statt, zu dessen Darstellung unendlich viele Zwischenfiguren nothwendig wären. Allein schon aus den gezeichneten vier Stadien ist zu entnehmen, dass die nächst dem Mittelpunkte des magnetischen Feldes gelegenen Kraftlinien eine continuierliche Drehung ausführen und somit gerade so wirken müssen wie die Kraftlinien des Magnetes NS in Fig. 10. Es erzeugt somit der Elektromagnetring $\alpha\,\beta\,\gamma\,\delta$ des Motors B (Fig. 13) ein magnetisches Drehfeld und würde eine metallene Kugel K, die um eine zur Zeichnungsebene senkrechte Achse f drehbar ist, in rasche Rotation versetzen. Noch höhere mechanische Effecte lassen sich erzielen, wenn man die Kugel K durch einen mit Kupferdrähten umwickelten Eisenkern (Fig. 15) ersetzt, wie schon von Ferraris nachgewiesen wurde.

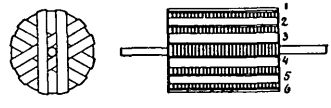

Fig. 15.

Die in den Kupferleitungen 1, 2, 3 u. s. w. entstehenden Inductionsströme wirken magnetisierend auf den von ihnen umschlossenen Eisenkern, und zwar in solcher Art, dass die geweckten Magnetismen eine wesentliche Erhöhung des an der Achse f angreifenden Drehmomentes bewirken. Um die Entstehung von Inductionsströmen[1]) im Eisenkern selbst zu ver-

[1]) Foucault'schen Strömen.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

hindern, ist derselbe aus zahlreichen voneinander isolierten kreisrunden Platten zusammengesetzt. Es ist dies nothwendig, da sonst die im Eisenkern entstehenden Inductionsströme eine zwecklose Erwärmung desselben hervorrufen würden, die bedeutende Energieverluste involvirt.

Wir können nun wieder zur Erklärung des Ferraris'schen Versuches zurückkehren. Bekanntlich erzeugt jeder elektrische Kreisstrom magnetische Wirkungen, die der Fläche des Kreisstromes und der Intensität des Stromes direct proportional sind. Wir können den Kreisstrom $a\,b$ (Fig. 16) durch einen Magnet $N\,S$ ersetzen, dessen Moment, in absoluten elektro-magnetischen Einheiten gemessen, gleich ist dem Producte aus der Fläche des Kreisstromes in die Intensität desselben. Somit lassen sich auch die beiden Kreisströme $m\,n$ und $p\,q$ des Ferraris'schen Apparates näherungsweise durch vier Magnetpole ersetzen, welche die in Fig. 14 dargestellten Stadien der Reihe nach durchlaufen. Es ist somit erwiesen, dass auch beim Ferraris'schen Apparate die Bewegung der kupfernen Kugel durch die Drehung eines magnetischen Feldes hervorgerufen wird.

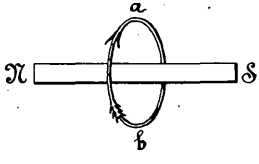

Fig. 16.

Will man den Tesla-Motor für Kraftübertragungen auf große Entfernung anwenden, so müssen die Wellenströme der beiden Leitungsschleifen $a\,a'$ und $b\,b'$ (Fig. 13)

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

transformiert werden, wie dies in Fig. 17 schematisch dargestellt ist.

Es bedeuten: *I* Doppelinductor, *M* Tesla-Motor, $T\,T_1$, $T'\,T_1'$ Inductionsspulen zur Transformation der Ströme, $a_1\,a_1'$, $b_1\,b_1'$ Fernleitungen. Die Vorgänge in den beiden Leitungsschleifen sind genau dieselben, welche an Fig. 5 erörtert wurden. Die Leitungen a_1 und b_1 lassen sich durch eine gemeinsame Rückleitung ersetzen, so dass im ganzen nur drei Fernleitungen

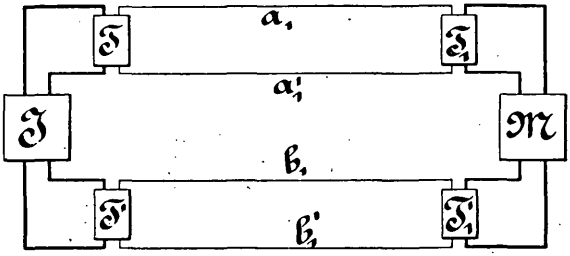

Fig. 17.

gebraucht werden. Die Stromwelle in der gemeinsamen Rückleitung ist durch die Curve *m n* in Fig. 11 dargestellt.

Nachdem die gemeinsame Rückleitung durch die Wellenströme stärker beansprucht wird als die beiden anderen Leitungen, muss auch ihr Querschnitt entsprechend größer gewählt werden.

Die Erkenntnis, dass drei Leitungen für eine Wechselstromkraftübertragung hinreichen, hat zur Construction von Motoren geführt, welche mit drei Wellen-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

strömen von gleicher Energie arbeiten. Wir erwähnen die Drei-Phasen-Strom-Motoren von Bradley, Wenström, Haselwander und Dobrowolsky.

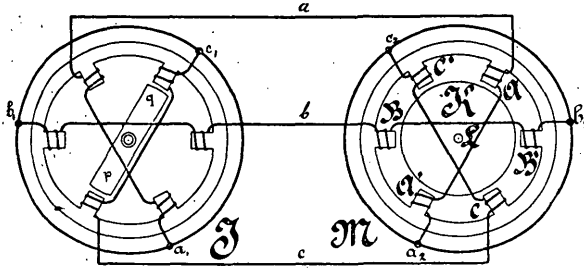

Fig. 18.

Fig. 18 zeigt das Princip der sechsspuligen Schaltung nach v. Dolivo-Dobrowolsky.

Im Inductor *I* erzeugt der rotierende Elektromagnet *p q* drei Inductionsströme, welche einerseits in

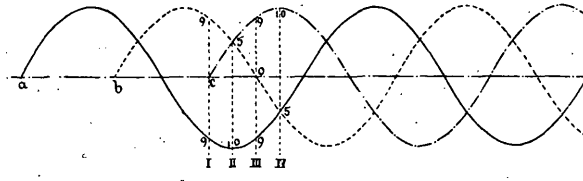

Fig. 19.

die drei Leitungen *a b c*, andererseits in die gemeinsame Ringleitung a_1 b_1 c_1 geführt werden.

Die Stromwellen besitzen eine Phasendifferenz von $^1/_3$ und $^2/_3$ Wellenlänge und sind in Fig. 19 dar-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

gestellt. Eine höchst merkwürdige Eigenschaft dieser drei Stromwellen besteht darin, dass ihre algebraische Summe Null ist, d. h. dass immer zwei Leitungen ebenso viel positive Elektricität bringen als die dritte negative oder vice versa. Um dies einzusehen, betrachten wir mehrere Stadien der drei Stromwellen.

Im Stadium I Fig. 19 hat die

Stromwelle	a	die	Intensität	-9 } [1]
„	b	„	„	$+9$ }
„	c	„	„	0
			Summe	0

Im Stadium II hat die

Stromwelle	a	die	Intensität	-10
„	b	„	„	$+5$
„	c	„	„	$+5$
			Summe	0

u. s. w. Entweder ist die eine Stromintensität Null und die beiden anderen sind einander entgegengesetzt gleich, oder die Summe der positiven Stromstärken ist der Zahl nach gleich der dritten negativen Stromstärke und vice versa. Es werden sich somit die in den Ringleitungen $a_1 b_1 c_1$ und $a_2 b_2 c_2$ zusammentreffenden Stromintensitäten vollkommen neutralisieren.

Die magnetischen Zustände der Pole AA', BB', CC, des in Fig. 18 dargestellten Motors M in den Stadien I, II, III, IV, sind aus den Diagrammen Fig. 20 zu entnehmen, wobei vorausgesetzt wird, dass positive Ströme

[1]) Genau genommen 8·6603.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

(nach aufwärts gerichtete Ordinaten in Fig. 18) in den Polen A, B, C Nordmagnetismus, in den gegenüberliegenden Polen A', B', C' Südmagnetismus erzeugen. Verbindet man die einander gegenüberliegenden ungleichnamigen Magnetpole durch gerade Linien, wie dies in den Diagrammen I bis IV (Fig. 20) geschehen ist, so erhält man ein annähernd richtiges Bild des Verlaufes der Kraftlinien des magnetischen Feldes. Dieselben gehen successive aus der einen Lage in die nächste über und bilden ein sich drehendes magnetisches Feld. Der

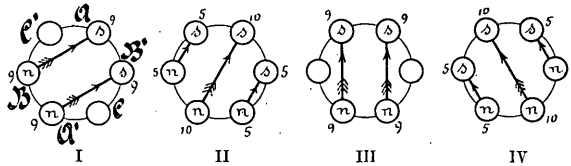

Fig. 20.

Anker K (Fig. 18), dessen Construction schon in Fig. 15 angedeutet ist, wird durch das magnetische Drehfeld in Rotation versetzt und bewegt die Achse L, an der eine Riemenscheibe sitzt und die Energie auf die Arbeitsmaschinen (Pumpen, Drehbänke, Webstühle u. s. w.) überträgt. Für Kraftübertragungen auf große Entfernung werden die vom Inductor I (Fig. 18) erzeugten Wechselströme mittels dreier Transformatoren auf Hochspannung gebracht, fortgeleitet und in der Nähe des Motors M rücktransformiert.

Es mögen nun noch einige Detailangaben über

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

die Kraftübertragungseinrichtung Lauffen—Frankfurt Platz finden. In Lauffen befand sich ein Inductor, welcher bei 150 Touren der Elektromagnetwelle pro Secunde eine Energie von 300 Pferdekräften aufnehmen konnte. Die mittlere Spannung betrug circa 50

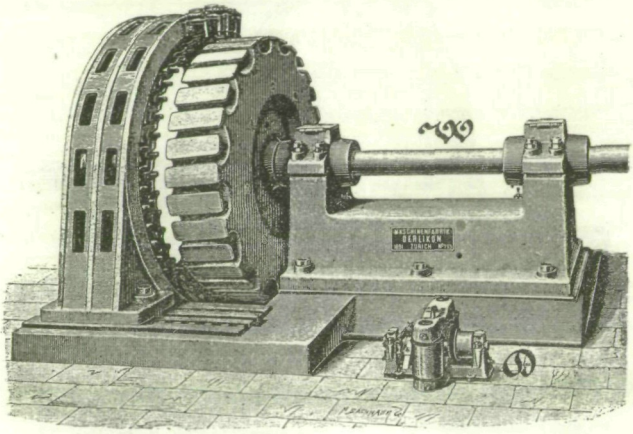

Fig. 21.

Volt, die mittlere Stromstärke 1400 Ampère. Zur Aufnahme dieser exorbitant hohen Stromstärke dienten Kupferkabel von 27 *mm* Durchmesser.

An Stelle des im Schema Fig. 18 gezeichneten einfachen Elektromagnetes *p q* wurde ein solcher mit 32 Polen verwendet. Derselbe ist an einer kräftigen Welle *W* befestigt (Fig. 21) und wird durch die kleine Dynamo-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

maschine *D* mit Strom gespeist.[1]) Die Klemmen der letzteren sind mit den Rollen *a b* Fig. 22 leitend verbunden und wird der Strom dem rotierenden Elektromagnetanker durch Metallsaiten, die über je zwei

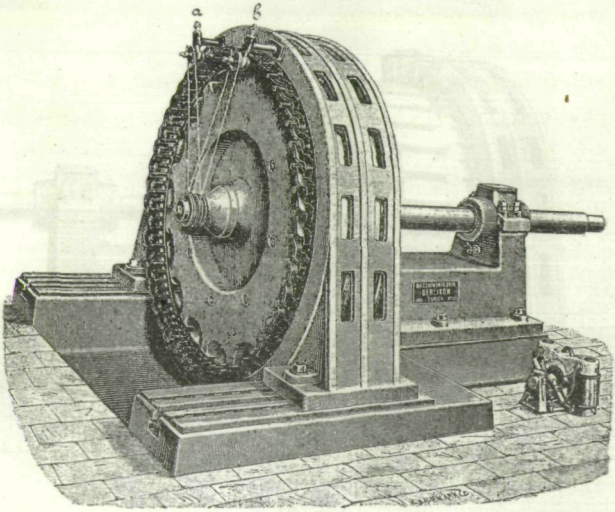

Fig. 22.

Rollen laufen, zugeführt. Das Totalgewicht der Maschine ohne Fundamentplatte beträgt 9000 *kg*.

Die primären und secundären Spulen der Trans-

[1]) Die Welle *W* ist in Fig. 21 etwas nach rechts verschoben gezeichnet, um die Gestalt der Elektromagnetpole sichtbar zu machen.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

formatoren (Fig. 23) waren durch Öl isoliert, da dieses eine weitaus höhere Isolierfähigkeit besitzt als Luft und die sonst üblichen Isoliermittel. Zur Fernleitung dienten Kupferdrähte von 4 *mm* Dicke, deren Gesammtlänge circa 530 *km* und deren Gewicht 60.000 *kg* betrug. Zur Unterstützung der Leitungen wurden 3000 kräftige Telegraphenstangen aufgestellt, die — um die Gefahr der hohen elektrischen Spannung auch jedem Laien ins Gedächtnis zu rufen — mit Todtenköpfen bezeichnet waren. Die Anordnung der Leitungen und Gestalt der Isolatoren ist aus Fig. 24 zu entnehmen.

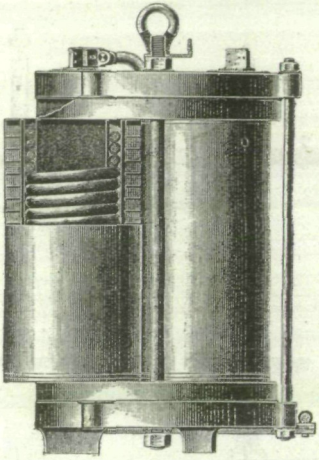

Fig. 23.

Die großen Isolatoren konnten nur für die Theilstrecke Lauffen—Eberbach (über $^1/_3$ der ganzen 175 *km* langen Strecke) rechtzeitig beigestellt werden, während der Rest mit Isolatoren kleinerer Gattung ausgerüstet wurde. Die an den Isolatoren angebrachten Rinnen wurden mit Hilfe einer Spritze, deren Mündungsrohr hakenförmig gebogen ist, mit Öl gefüllt, um auch bei feuchtem Wetter eine sichere Isolierung der Leitung zu erzielen.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

In der Secundärstation am Ausstellungsplatze in Frankfurt werden die Hochspannungsdrähte drei Transformatoren zugeführt, die in einem besonderen abgesperrten Raume untergebracht sind. Durch die Transformatoren wird die Spannung[1]) auf ca. 100 Volt herabgemindert, und der transformierte Strom dient zur Speisung von 1000 parallel geschalteten Glühlampen, sowie zum Betriebe eines Motors System Dolivo-Dobrowolsky, dessen Achse direct mit einer großen Centrifugalpumpe gekuppelt ist. Die Ringleitungen a_1 b_1 c_1—a_2 b_2 c_2 (Fig. 18) sind in den Endstationen mit der Erde verbunden, um durch diese bei eventuell eintretenden Störungen eine Ableitung von Stromüberschüssen zu ermöglichen.

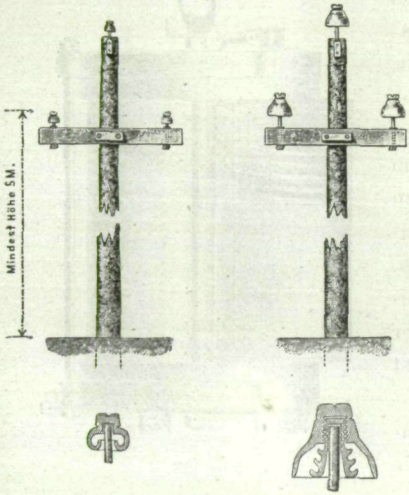

Fig. 24.

Raum und Zeit verbieten es, auf weitere Detailangaben einzugehen. Auch ist zu bedauern, dass die

[1]) Es wurde mit Hochspannungen bis zu 27000 Volt gearbeitet.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Messresultate der wissenschaftlichen Commission noch nicht veröffentlicht wurden und somit genaue Daten über den Nutzeffect[1]) der Anlage noch nicht gegeben werden können. Allein dass die erzielten Resulte einen gewaltigen Fortschritt auf elektrotechnischem Gebiete bedeuten, ist wohl nicht in Frage zu stellen und möge dies durch die Worte bekräftigt werden, welche von Helmholtz bei der Schlussfeier der Frankfurter Ausstellung an seine Zuhörer richtete. v. Helmholtz sagt: „Für die Kraftübertragung ist in der That die Einführung der Wechselströme und die Erfindung der Drehstrommaschine eine Sache von großer Wichtigkeit. Denn wenn wir Gleichströme fortführen wollen über lange Strecken, so verlieren wir auf dem Wege einen großen Theil der Kraft durch den Vorgang, den wir als galvanischen Widerstand in der Leitung bezeichnen. Bei den Wechselströmen dagegen, welche durch ein System von Transformatoren hindurchgeführt werden, können wir einen Zustand herstellen und Verhältnisse, bei denen die Wirkung des Leitungswiderstandes in längeren Leitungen, wie z. B. einer solchen von Lauffen herkommenden, verhältnismäßig unbedeutend wird. Allerdings tritt nun die andere Gefahr ein, dass wir sehr stark gespannte Ströme gebrauchen müssen und diese sehr leicht überspringen und entweder Bögen von geschmolzenem Metall hervorbringen können, welche eine mächtige Zündkraft haben oder, wo lebende

[1]) Derselbe beträgt circa 75 Procent.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Wesen den Drähten zu nahe kommen, diese tödten können. Wir mussten also lernen, mit dieser Gefahr zu rechnen, und auch im großen Maßstab prüfen, wieviel Kraft verloren geht. Es ließ sich nicht vorher vollständig übersehen, ob nicht die Verluste des Stromes bei den starken Spannungen auf so langer Leitung sehr viel größer sein würden als bei schwachen Strömen. Nun scheint es schon nicht mehr zweifelhaft zu sein, dass dieses Experiment außerordentlich gut gelungen ist, und dass damit die Möglichkeit entsteht, es an vielen Orten zu wiederholen und eine ganze Menge von Wasserkräften, die an abgelegenen Orten wirksam sind, zu gewinnen für den Nutzen der Menschheit. Damit ist immerhin sehr viel gewonnen. Diese ganze Entwicklung der Drehstrommaschine, diese Erleichterung, welche der Wechselstrom bei den langen Leitungen gibt, ist erst in den jüngsten Jahren gefunden worden. Es gehörte dazu eben die Erfindung der Drehstrommaschinen, an denen nun wahrscheinlich noch mancherlei zu vervollkommnen sein wird. Das können wir ruhig der weiteren Zeit überlassen, der Anfang ist gemacht. Wir sehen, dass damit Großes zu erreichen ist, und es ist ein wesentliches Verdienst, ein Verdienst von außerordentlich großer national-ökonomischer Wichtigkeit, dass dieser Beweis durch die hiesige Ausstellung geliefert worden ist."

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien

Jahr/Year: 1892

Band/Volume: 32

Autor(en)/Author(s): Jüllig Max

Artikel/Article: Über elektrische Kraftübertragung mittels Mehr-Phasenstrom. 399-430