Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 2

Artikel: Erschütterndes und Faszinierendes über Elektrizität

Autor: Prinz, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915796

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Erschütterndes und Faszinierendes über gespeicherte Elektrizität

Von *H. Prinz,* München

621.355

1. Das Musschenbroeksche Experiment

Zu Beginn des Jahres 1745 beschäftigte man sich an der berühmten Universität Leyden mit der allgemein interessierenden Frage, ob es möglich sein könnte, die durch Reibung erweckbare Elektrizität eine Zeitlang wirksam zu erhalten, um sie dann später gleichsam im verwahrten Zustand für mancherlei Zweckdienlichkeiten gegenwärtig zu haben. Die in jener Zeit vielenorts geübten Experimentierkünste haben nämlich die Erfahrung eingebracht, dass elektrisierte Konduktoren erstaunlich rasch ihre Ladung verlieren, sobald die Zureichung von erweckter Elektrizität unterbrochen wird. *Petrus van Musschenbroek* (Fig. 1), eminenter Naturforscher und durch seine zahlreichen Schriften bekannter Professor für Mathematik und Physik der Universität Leyden, schien von diesem Problem ganz besonders fasziniert gewesen zu sein, denn er glaubte, selbst einige Experimente zur Abklärung dieser Frage beitragen zu sollen. In dieser so bekundeten Zielstrebigkeit kam er eines Tages auf den erstaunlichen Gedanken, den Konduktor mit einem nichtleitenden Gefäss zu umhüllen, wohl in der Vermutung, dass die den Konduktor umgebende Luft die eigentliche Verursachung für den raschen Verlust seines elektrisierten Zustandes sein müsse. So nahm er eine Glasphiole, füllte sie mit Wasser und elektrisierte darnach ihren Inhalt mit Hilfe einer geriebenen Glaskugel über einen in die Glasphiole hineinführenden Konduktor. In gespannter Erwartung musste er jedoch sogleich die betrübsame Erfahrung machen, dass der nunmehr mit einer nichtleitenden Hülle umgebene Konduktor wiederum erstaunlich schnell — wie auch bei früheren Experimenten — seine Elektrizität verloren hatte. Einige Tage später kam es indessen zufälligerweise dazu, dass einer seiner Mitarbeiter plötzlich einen ihn erschütternden Schlag bekam, und zwar in jenem Augenblick, als er in der einen Hand die wassergefüllte Glasphiole hielt und zugleich mit der anderen Hand den Konduktor berührte, denn in diesem Moment konnte sich die durch das Wasser verstärkte Elektrizität — wie sie später genannt wurde — über den Körper des Experimentierenden wirkungsvoll entladen [15][1].

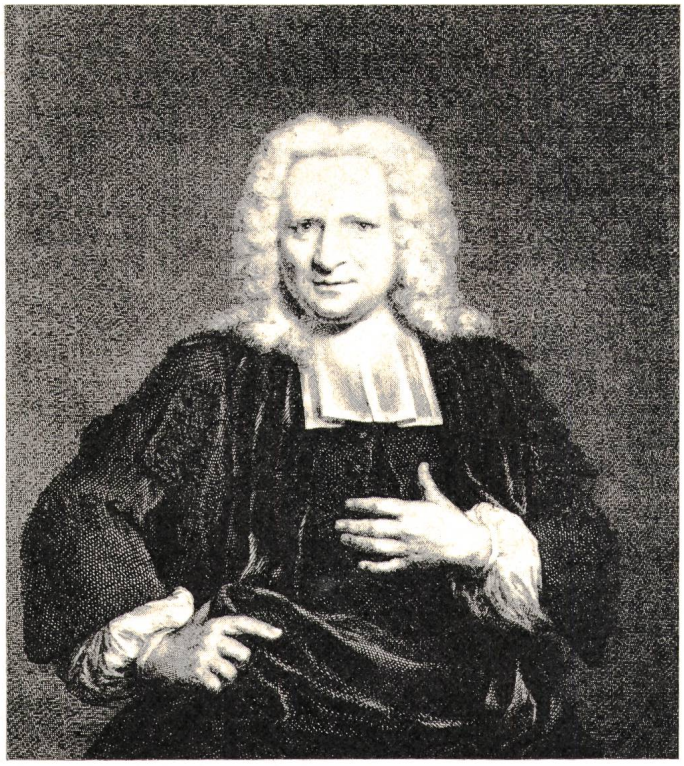

Fig. 1
Petrus van Musschenbroek 1692—1761

Soweit sich aus einem an den damaligen Präsidenten der Royal Society London gerichteten Brief vom 4. Februar 1745 entnehmen lässt, musste es *Jean Nicolas Sebastian Allamand* gewesen sein — gebürtig aus Lausanne und damals 31jähriger Assistent des Professors —, der die Erschütterungen einer verstärkten Elektrizität erstmals zu verspüren bekam, denn dieser Brief muss ohne Zweifel als die erste authentische Nachricht über diesen neuartigen Effekt einer oftmals als wundersam betrachteten Elektrizität angesehen werden. Es heisst darin [1]:

> There is an Experiment that Mr. *l'Allamand* has tried; he electrify'd a tin Tube, by means of a glaſs Globe; he then took in his left Hand a Glaſs full of Water, in which was dipped the End of a Wire; the other End of this Wire touched the electrified tin Tube: He then touch'd, with a Finger of his right Hand, the electrified Tube, and drew a Spark from it, when at the ſame Inſtant he felt a moſt violent Shock all over his
> H 2 Body.

Der Skribent fügte hinzu, dass sich böhmisches Glas für dieses Experiment am besten eignen würde, dass aber die erschütterndsten Wirkungen mit einem Bierglas zu verspüren seien. Auch *Van Musschenbroek,* der Professor — so heisst es in dem Brief weiter — hat das Experiment mit einer besonders dünnwandigen Schale wiederholt und dabei einen höchst er-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Fig. 2
Das Musschenbroeksche Experiment nach einer Darstellung von Winkler [3]

schreckenden Schlag empfunden. Allerdings ist dieser Brief erst am 13. Februar 1746 — also ein Jahr später — in der Royal Society vorgelesen und danach in den Philosophical Transactions veröffentlicht worden, was jedoch in jener Zeit nicht ungewöhnlich war, wenn man bedenkt, dass mancher wissenschaftliche Bericht erst nach einigen Jahren in Form einer öffentlichen Lesung einem Kreis interessierter Gelehrter vorgetragen worden ist. So wird verständlich, dass die bedeutsame Entdeckung von der schlagversetzenden Wirkung einer verstärkten Elektrizität zunächst unbeachtet geblieben ist.

Immerhin ist denkbar, dass dieser Umstand *Van Musschenbroek* dazu bewogen haben konnte, an seinen reputierlichen französischen Kollegen *René de Réaumur* einen Brief mit Datum vom 17. Januar 1746 zu schreiben, in dem er über ein schreckliches Experiment berichtet, das ihn furchtbar erschüttert habe [18]:

«Je veux vous communiquer une expérience nouvelle, mais terrible, que je vous conseille de ne point tenter vous même... tout d'un coup ma main droite fut frappée avec tant de violence, que j'eus tout le corps ébranlé comme d'un coup de foudre... en un mot, je croyois que c'étoit fait de mois...»

Die Nachricht, dass ein Professor vom Range eines *Van Musschenbroek* durch die Elektrizität so heftig erschüttert worden sei, dass er den erhaltenen Schlag mit den Wirkungen eines Blitzstrahles verglichen habe, musste verständlicherweise in der Öffentlichkeit das allergrösste Aufsehen erregen, zumal man nicht begreifen konnte, wie die Elektrizität dergleichen Gewalt haben sollte, sofern nur ein Draht in einer Flasche Wasser elektrisiert wird, die eine Person in Händen hat. So konnte es nicht ausbleiben, dass sich auch andere Naturforscher und Gelehrte mit dem *Musschenbroek*schen Experiment beschäftigt haben, um die erschütternden Wirkungen der Elektrizität zur Gänze an sich selbst zu erfahren.

2. Winklers gläserne Gefässe

Mit zu den eifrigsten Experimentatoren jener Zeit, die vorbehaltlos entschlossen waren, das Musschenbroeksche Experiment selbst zu erproben, gehörte *Johann Heinrich Winkler*, Professor für Altphilologie an der Universität Leipzig. In einem Brief vom April/Mai 1746 berichtete er einem Freunde in London von den Wirkungen einiger erschütternder Schläge, die er sich und seiner Frau versetzt habe, und die so heftige Beschwerden in Form von Kopfschmerzen, Nasenbluten, Fieber und Schwächeanfällen zur Folge hatten, dass *Winkler* schliesslich gezwungen war, seine rühmlichen Experimente ehestens wieder einzustellen. Dies wird auch verständlich, wenn man bedenkt, dass selbst die hervorragendsten Naturforscher jener Zeit keinerlei Vorstellungen von den Wirkungen einer nunmehr gewaltsam gewordenen Elektrizität haben konnten.

Ungeachtet dieser unerwarteten und schmerzverursachenden Folgen war *Winkler* von der Stärke der elektrischen Kraft eines mit Wasser gefüllten gläsernen Gefässes so beeindruckt, dass er noch im gleichen Jahre eine bemerkenswerte Schrift verfasst hat [3], in deren Vorrede er geradezu von einer Wissbegierde spricht, die Ursache zu erforschen, warum die Elektrizität verstärkt wird, wenn man einen Draht in einer Bouteille Wasser elektrisiert. Auch beschreibt er anhand eines Kupferstiches (Fig. 2) das Musschenbroeksche Experiment wie folgt:

«Wenn eine Person mit der einen Hand a eine gläserne Flasche Wasser b hält, in welcher ein metallner Drath cd steckt... und mit einem Finger n der anderen Hand sich dem Drathe cd in der Zeit, da er durch Hilfe der Glaskugeln electrisiert wird, auf eine gewisse Weite nähert, so entsteht an dem Finger ein schmerzhafter Funken, welcher den Leib dieser Person erschüttert.»

Im weiteren Verlauf seiner Ausführungen berichtet *Winkler* von einem Gymnasiasten, dessen ganzer Körper erschüttert worden sei, insbesondere aber dessen Haupt, so dass die Zähne geklappert und sich die Lippen verzogen haben und schliesslich sein ganzes Gesicht feuerrot geworden ist. Dann kommt er zu der Meinung, dass zur Verstärkung der elektrischen Kraft anstelle von Wasser ebenso Quecksilber, Spiritus Vini, warmer Kaffee, Essig, Tinte, Schusterschwärze, Oleum Vitrioli, Wein, Bier und geschmolzene Butter Verwendung finden könne.

Bei der bereits damals offenkundig gewordenen Gefährlichkeit der Elektrizität war Professor *Winkler* bedachtsam genug, die verstärkte Elektrizität für die Folge nur noch so zu erforschen, dass die Gesundheit der an den Experimenten beteiligten Personen keinesfalls gefährdet sein konnte. In diesen seinen Bemühungen kam er auf den Gedanken, das jeweils verwendete gläserne Gefäss mit einer eisernen Kette zu umgeben, welche die bisher benutzte Handfläche des Experimen-

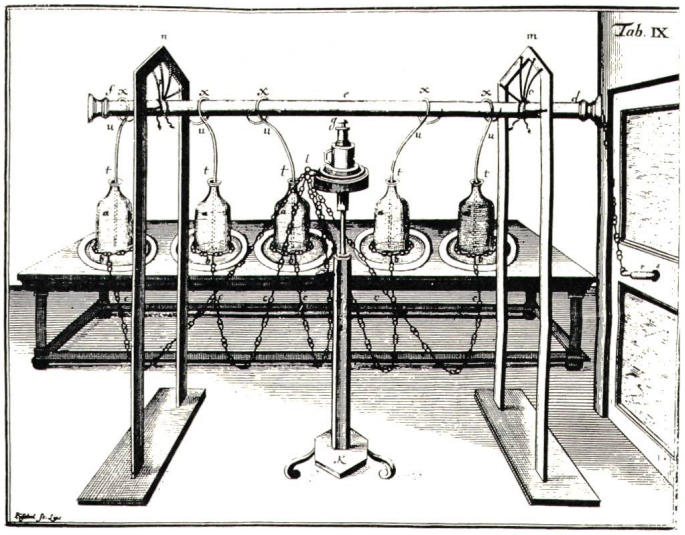

Fig. 3
Batterie mit fünf gläsernen Gefässen nach Winkler [3]

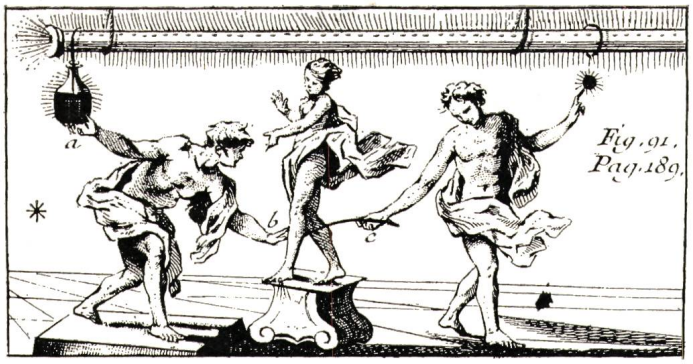

Fig. 4
Personenkette, der eine Dosis verstärkter Elektrizität bevorsteht, nach einer Darstellung von Rabiqueau [5]

tierenden zu ersetzen hatte. Zudem erkannte er bald, dass die dem Glase mitgeteilte Elektrizität um so wirksamer sein würde, je mehr Wasser das betreffende gläserne Gefäss enthielt, was ihn schliesslich dazu veranlasste, fünf solcher Gefässe zusammenzuschliessen (Fig. 3). Damit war noch im Jahre 1746 die erste Batterie für ein längeres Wirksambleiben von Elektrizität entstanden, deren Effekte naturgemäss noch gefährlicher sein mussten.

Aber schon bei dem Musschenbroekschen Experiment konnten unter Umständen sehr nachhaltig wirkende Erschütterungen auftreten, wie die folgende kleine Rechnung erkennen lässt: Wenn man davon ausgeht, dass unter günstigen Witterungsbedingungen mit handgeriebenen Glaskugeln Spannungen von wenigstens 10000 V erreicht werden konnten, dann ist der Experimentierende bei einem Körperwiderstand von 1000 Ω mit impulsartigen Strömen von einigen 10 A beansprucht worden, die trotz ihrer extrem kurzen Dauer von einigen 10 milliardstel Sekunden die späterhin auch beobachteten Wirkungen zur Folge haben mussten. Für die Zeitkonstante des sich zu denkenden *RC*-Kreises folgt bei einer wirksamen Kapazität von 30 pF zwischen Hand- und Wasserfläche der Glasphiole ein Wert von 30 milliardstel Sekunden. Das Musschenbroeksche Experiment ist also im heutigen Sinne ein Impulsexperiment gewesen, wenn auch glücklicherweise nur mit sehr kleinen Energien in der Grösse einiger mWs.

3. Die Leydener Flasche

Nach dem Bekanntwerden des Musschenbroekschen Experiments hat auch der vortreffliche französische Naturforscher *Abbé Nollet* alsbald einige Versuche in Paris angestellt und manche ausserordentliche Erschütterung über sich ergehen lassen. Zudem meinte er, dass die einer «Bouteille de Leyde» entnehmbare verstärkte Elektrizität auch an einer Personenkette wirksam sein müsse. Der grossartigste Schauversuch dieser Art fand am 13. April 1746 vor *Ludwig XV.* und seinem Hofstaat im Schloss von Versailles statt: *Nollet* liess zu diesem Zweck 180 Soldaten der Königlichen Garde im Kreise aufstellen und sie untereinander die Hände geben. Unerwartet versetzte er dann der Kette eine gehörige elektrische Erschütterung, wobei alle Soldaten, zum Gelächter der Anwesenden, fast gleichzeitig in die Höhe sprangen. Kurze Zeit darauf wiederholte er dieses Experiment in Paris mit 700 Kartäusermönchen [18].

Bei dem allseitigen Interesse, das die Öffentlichkeit den Nolletschen Schauversuchen gegenüber bekundet hat, mag es zu verstehen sein, dass das gleichzeitige Erschüttern von mehreren Personen durch einen einzigen Schlag späterhin oftmals wiederholt worden ist, wohl auch in der Absicht, sich auf diese Weise ein wenig an der Elektrizität belustigen zu können. Ob allerdings die simultangeschockten Personen ihre empfangenen Erschütterungen als ebensolche Belustigung empfunden haben mochten, muss wohl sehr bezweifelt werden, insbesondere wenn für das beabsichtigte Experiment eine Leydener Flasche grösseren Inhaltes benutzt worden war. Gleichermassen scheinen die in Fig. 4 dargestellten Personen, denen eine Dosis gemeinsamer Erschütterung unmittelbar bevorsteht, wenig erfreut gestimmt zu sein.

Um die gleiche Zeit war es *Louis Jallabert,* damals Professor der Experimentalphysik an der Akademie zu Genf, der in seinem 1749 erschienenen Buch «Experiences sur l'Electricité» über die Fortleitbarkeit der erschütternden Wirkungen einer Leydener Flasche berichtet [4]. Er benutzte dazu eine Vorrichtung nach Fig. 5 mit fünf zirkulförmig angeordneten Waschbottichen, die über wassergefüllte Heber in Verbindung standen. In einem der kleineren Gefässe befand sich eine Leydener Flasche, die mit ihrem Drahtende an den elektrisierbaren Konduktor angeschlossen werden konnte. Sobald nun der Experimentierende mit einem Finger seiner linken Hand die Wasserfläche eines der Gefässe berührte und gleichzeitig mit einem Finger seiner rechten Hand den Konduktor, dann konnte er einen ebenso kräftigen Schlag empfinden wie bei einer Berührung der die Leydener Flasche unmittelbar umgebenden Wasseroberfläche. Somit musste sich die elektrische Erschütterung praktisch unvermindert über das Wasser fortgepflanzt haben, was auch schon von *William Watson* beobachtet worden war.

Bei der Beachtung, die man den bereits damals bekannten Elektrifikationskuren in den allerersten Anfängen einer Elektromedizin beigemessen hatte, konnte es nicht ausbleiben, dass der zu kurierende Patient sehr bald den nunmehr viel wirkungsvoller gewordenen Schlägen einer verstärkten Elektrizität ausgesetzt worden ist, obwohl man nicht immer von ihrem vorzüglich nützlichen Gebrauch überzeugt gewesen war. Indessen sind für alle erdenklichen Malaisen phantasievolle Kuren mit dem dazu erforderlichen Instrumentarium ersonnen worden, um die verstärkte Elektrizität in möglichst umfassender Weise auf ihre vermeintlichen Kurerfolge erproben zu können. So wird von dem Salzburger Professor *Dominicus Beck* in einer zusammenfassenden Darstellung anhand einer Figur (Fig. 6) erläutert [8], in welcher Weise man den erschüt-

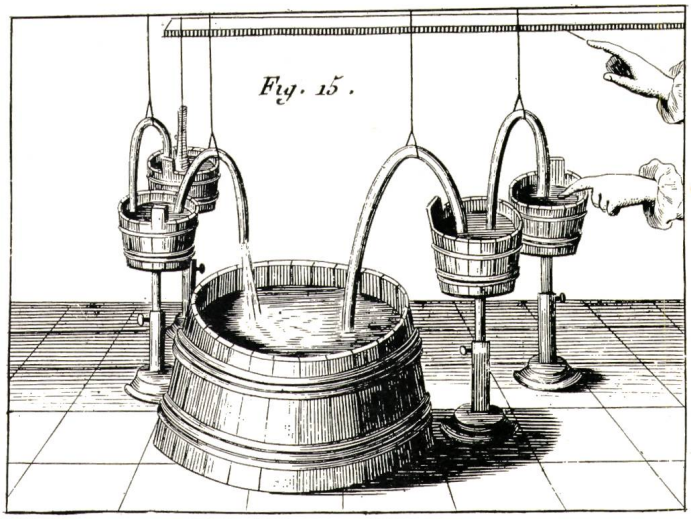

Fig. 5
Fortleitung der verstärkten Elektrizität über wassergefüllte Bottiche nach Jallabert [4]

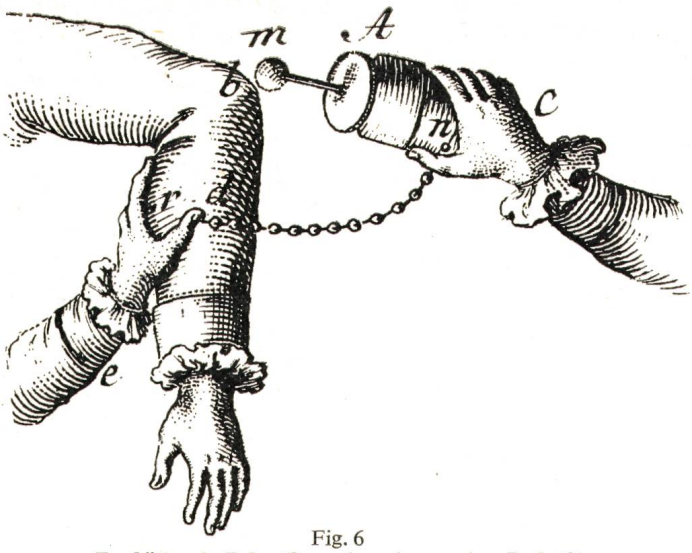

Fig. 6
Erschütternde Behandlung eines Armes. Aus Beck [8]

ternden Schlag einer Leydener Flasche auf den leidenden Körperteil ausrichten müsse:

«Gesetzt: Die Flasche A sey geladen und man will den Schlag von b nach d führen, so fasst man sie mit der rechten Hand c an der äusseren Belegung, haltet mit der linken das Ende der Kette nr, welche mit der äusseren Belegung Gemeinschaft hat, bey dem einen Ende des leidenden Theiles d fest an und nähert den Knopf m dem anderen Ende b, so wird die angehäufte elektrische Materie bey b hineingehen, die zwischen b und d liegenden Theile erschüttern, und nach diesem alsogleich an der Kette rn in die äussere Belegung übergehen, um endlich in das allgemeine Behältnis der Elektricität zu gelangen.»

Beck fügte hinzu, dass man natürlich mehrere Verstärkungsflaschen vorrätig haben sollte, die in Rücksicht der Grösse ihrer Belegungen verschieden sein müssten. Auch für die Zahntherapie hat man sich manch originelles Instrument einfallen lassen, um die zu applizierende Erschütterung desto leichter auf den zu behandelnden Zahn ausrichten zu können, wozu *Abbé Bertholon de St-Lazare* die in Fig. 7 dargestellte Vorrichtung vorschlägt: Damit würde — so meinte er — die Erschütterung bloss durch einen einzigen Zahn hindurchgeleitet werden können, ganz zum besseren Befinden des zu kurierenden Patienten. Es frägt sich allerdings, ob die schlagversetzende Kur mit einem so schrecklich anmutenden Instrument wirklich zu der beabsichtigten Schmerzlinderung geführt hat.

Fig. 7
Zahntherapie nach Abbé Bertholon de St. Lazare [9]

Aber noch mancherlei andere Kuriositäten sind in jener Zeit erdacht worden: So wird von einer elektrischen Lampe berichtet, die von einem Basler Bürger namens *Fürstenberger* erfunden worden sein soll und mit deren Hilfe es ermöglicht werden konnte, sich zur Nachtzeit auf eine sehr bequeme Art ein Licht zu verschaffen, ohne sich eines anderen Feuerzeugs bedienen zu müssen — so meinte jedenfalls ihr Erfinder [7]. In Fig. 8 ist eine etwas modifizierte Ausführungsform dieser Lampe dargestellt, die im wesentlichen aus einem Behälter A mit der darin enthaltenen «brennbaren Luft» bestand. Sofern man ein gewünschtes Nachtlicht haben wollte, musste lediglich der Verschluss f geöffnet und die vorher geladene Leydener Flasche über die beiden Spitzen qq in Form eines kleinen Funkens zur Entladung gebracht werden. Es bleibt dahingestellt, ob der Besitzer einer solchen Lampe während ihres Gebrauchs auch immer guter Laune geblieben ist.

Manches Mal musste es auch die spielerische Phantasie gewesen sein, die sich in vielgestaltiger Art und getragen von

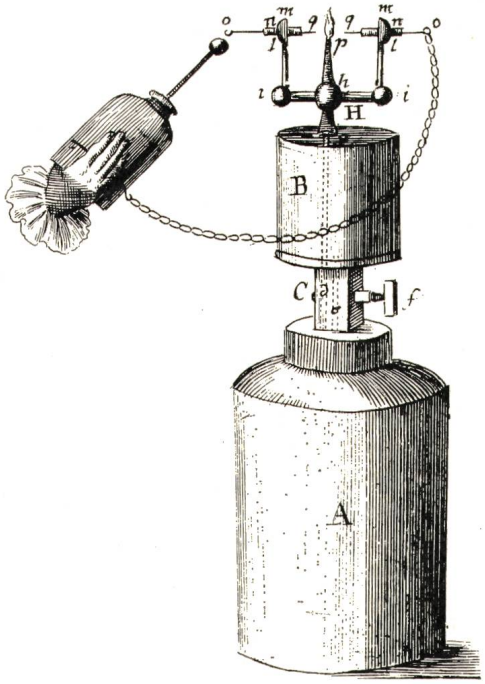

Fig. 8
Elektrische Lampe. Aus Donndorff [7]

ideenreichen Vorstellungen wirkungsvoll bekundet hat. Wohl mit zu den besten Veröffentlichungen dieser Art gehört das von dem Nürnberger Consulenten *Carl Alexander Faulwetter* stammende mehrbändige Büchlein über «Kurze Grundsätze der Elektricitätslehre», in welchem vor allem im 4. Band eine Fülle ergötzlicher elektrischer Spielwerke beschrieben sind, wie beispielsweise die elektrische Zauberuhr (Fig. 9): «Sofern Jemand eine Stunde wählet und darauf ein Stück Geld leget, so schläget die Elektricität die gewählte Stunde», heisst es im Büchlein. Dann sind es aber auch zum Nachdenken veranlassende Experimente, wie sie sich in der bereits erwähnten Veröffentlichung des Salzburger Professors *Beck,* beispielsweise als brennendes Haus finden (Fig. 10), das einmal durch einen Blitzstrahl und das andere Mal durch eine Leydener Flasche zur Entzündung gebracht worden ist. Man hatte eben schon damals in einer breiteren Öffentlichkeit klar erkannt, dass die Wirkungen des Blitzstrahles einer geladenen Gewitterwolke mit der zündenden Wirkung eines Funkens verglichen werden könne, der einer Leydener Flasche entlockbar ist. Ein nicht

minder erstaunliches Repertoire an phantasievollen Experimenten findet sich in einem Büchlein von *S. Hashimoto,* das in stilvoll gehaltenen Skizzen die Wirkungen einer verstärkten Elektrizität eindrucksvoll illustriert (Fig. 11).

4. Leydener Flaschenbatterien

Wie bereits erwähnt, ist es Professor *Winkler* gewesen, der den Gedanken des Zusammenschliessens mehrerer Leydener Flaschen zu einer einzigen Batterie erstmals verwirklicht hat. Im Verlaufe der folgenden Jahrzehnte sind dann besonders auf Anregung von *Josef Priestley* immer grössere Batterien gebaut worden, um auf diese Weise mehr wirksame Elektrizität zum Experimentieren zur Verfügung zu haben. Eine für die damaligen Vorstellungen bereits beachtliche Anlage ist im Jahre 1773 von dem Londoner Mechanicus *Eduard Nairne* gebaut worden (Fig. 12), die aus insgesamt 64 Leydener Flaschen mit einer

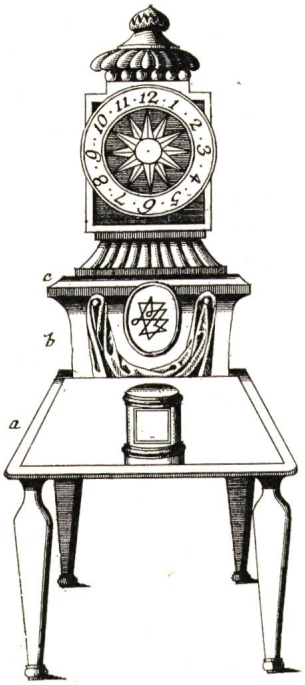

Fig. 9
Die elektrische Zauberuhr. Aus Faulwetter [10]

metallisch belegten Oberfläche von rund 5 m² bestanden hatte, so dass die einspeicherbare Energie einige 10 Ws betragen haben musste. Mit dieser Anlage sind erstmals dünne Eisendrähte von etwa einem Meter Länge explosionsartig verdampft und in sich anschliessenden Tierexperimenten eine Ente und ein Truthahn getötet worden [16]. Die größte Batterie der damaligen Zeit ist kurz vor der Jahrhundertwende von dem in Amsterdam lebenden englischen Instrumentenmacher *John Cuthbertson* auf Veranlassung des seinerzeitigen Direktors des Teylerschen Museums, *Martinus van Marum* errichtet worden. Mit dieser aus 100 Leydener Flaschen bestehenden Anlage, die eine Einspeicherung bis zu 600 Ws ermöglicht hatte, sind bereits elektrische Funken beachtlicher Stärke erzeugt, Holzstücke zerspalten und Eisendrähte bis zu 4,5 m Länge zur Explosion gebracht worden. Auch konnten erstmals magnetische und chemische Wirkungen einer strömenden Elektrizität beobachtet werden, die nach dem Bau der ersten Voltaschen Säule allseitige Beachtung gefunden und schliesslich *Michael Faraday* zu seinen berühmt gewordenen Experimenten des Jahres 1831 veranlasst haben, die erkennen liessen, dass Elektrizität auch aus Magnetismus erzeugt werden kann. Um

Fig. 10
Das brennende Haus nach Beck [8]

diese Zeit liess sich *Georg Simon Ohm* für eigene Experimente eine Batterie für rund 50 Ws bauen, die noch heute in der Abteilung Elektrostatik des Deutschen Museums im Original zu sehen ist (Fig. 13).

5. Elektrische Energiespeicher in der Elektrizitätsversorgung

Einen beachtenswerten neuen Impuls hat der elektrische Energiespeicher durch die Elektrizitätsversorgung erfahren, die sich seit der erfolgreichen Inbetriebnahme der ersten Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung (HDÜ) zwischen Lauffen am Neckar und Frankfurt am Main im Jahre 1891 während ihrer nunmehr 80jährigen Geschichte in kaum vorstellbarer Weise entfalten konnte. Im Laufe dieser Entwicklung hat sich aus der Sicht des stetig wachsenden Bedarfes an elektrischer Energie die zwingende Notwendigkeit ergeben, die Verteilungsnetze mit ihren Betriebsmitteln, zu denen auch der elektrische Energiespeicher in Form des Kondensators gehört, für immer höhere Leistungen und damit auch für immer höhere Betriebsspannungen auszulegen. Dies hat dazu geführt, dass der Kondensator zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel modern geführter elektrischer Versorgungsnetze geworden ist, sei es zum Zwecke einer Querkompensation am Verbraucher oder sei es

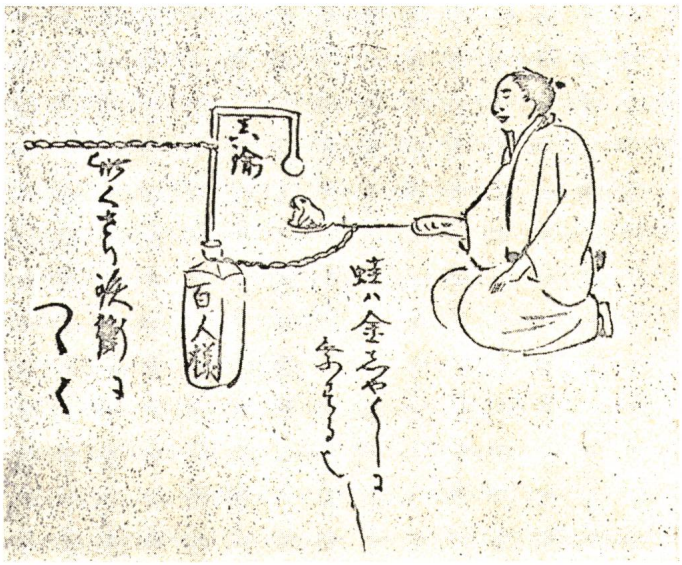

Fig. 11
Froschexperiment nach S. Hashimoto

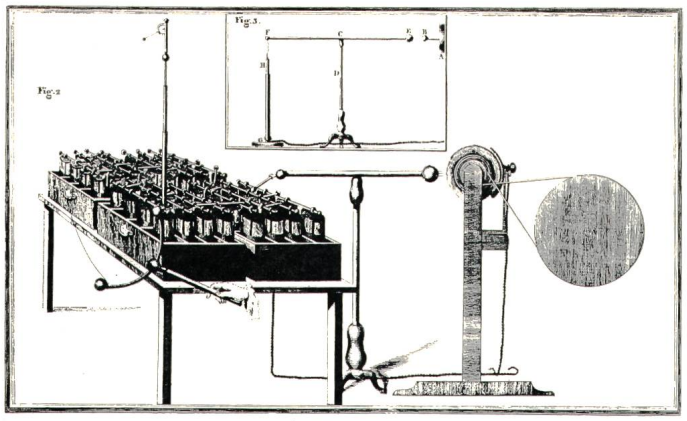

Fig. 12
Leydener Flaschenbatterie nach Nairne [6]

für eine Längskompensation von Hochspannungsleitungen zur Anhebung ihrer übertragbaren Leistung oder zur Verbesserung ihres Stabilitätsverhaltens. Für eine Verwirklichung dieser modernen Kompensationstechnik müssen heute leistungsfähige Kondensatoranlagen bis zu Blindleistungen von einigen 100 Mvar — entsprechend einer speicherbaren Energie von einigen 100 kWs — zur Verfügung stehen. So wird verständlich, dass in Netzen von der Grösse des bestehenden westeuropäischen Verbundnetzes, das im abgelaufenen Jahr rund 1 Billion an erzeugten Kilowattstunden zu verteilen hatte, eine nicht mehr übersehbare Anzahl von Kondensatoren in verschiedenen Netzbereichen eingesetzt sind.

Aber auch im Verbande einer an Bedeutung gewinnenden Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) ist der Kondensator zu einem wichtigen Betriebselement geworden, denn für jedes MW an zu übertragender Wirkleistung ist etwa ein Mvar an Blindleistung bereitzustellen. Ein Teil dieser Blindleistung dient zur Oberwellenkompensation der im Gleich- und Wechselrichter erzeugten Oberwellen, wozu oftmals eigene Filterkondensatoren verwendet werden (Fig. 14).

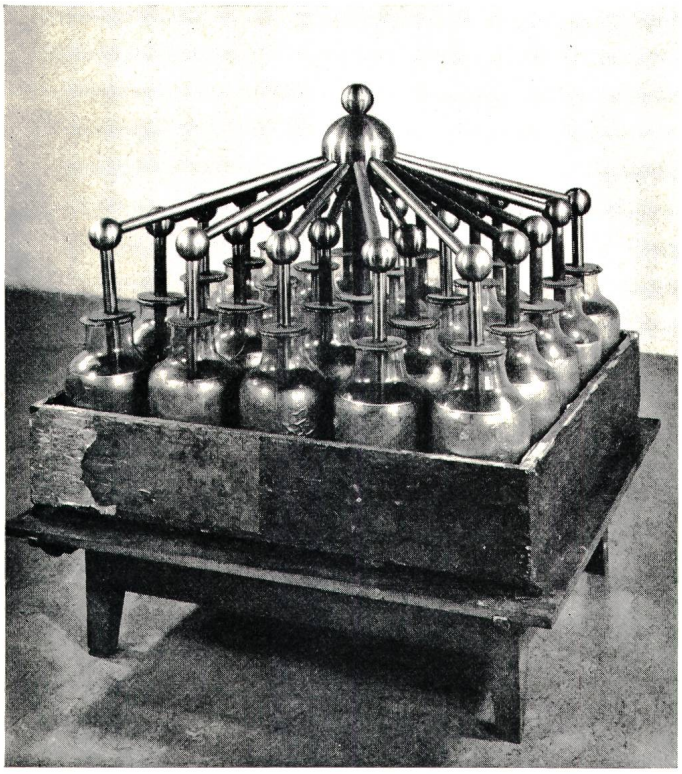

Fig. 13
Batterie von Georg Simon Ohm aus dem Jahre 1840

6. Die Greinacher-Kaskade

Es ist erstaunlich, dass man sich bereits zu Beginn der zwanziger Jahre die Frage vorgelegt hatte, auf welche Weise es möglich sein könnte, sehr hohe Gleichspannung für die verschiedensten Experimentierzwecke greifbar zu haben. Der eigentliche Anlass dazu war der schon lang gehegte Wunsch, die physikalischen Phänomene des hochgespannten Gleichfeldes näher analysieren zu können. Im Verfolg dieses Gedankens hat *Hermann Heinrich Greinacher,* ehemals Professor für Physik an der Universität Bern, im Jahre 1921 eine elegante Schaltung vorgeschlagen, die im Prinzip darin bestand, durch eine sinnvolle Kombination von Kondensatoren und Ventilen einen kaskadenförmigen Spannungsaufbau möglich zu machen. Die späterhin nach dieser Schaltung gebauten Gleichspannungskaskaden bestanden aus zwei Kondensatorsäulen, die über horizontal und diagonal angeordneten Ventile in einen wohlabgestimmten Lade- und Entladerhythmus gebracht werden konnten. Heute stehen Greinacher-Kaskaden bis zu Gleichspannungen von einigen MV in offener oder druckgasisolierter Ausführung für ein breites Anwendungsspektrum zur Verfügung, wie beispielsweise für kernphysikalische Untersuchungen, dann für industrielle Bestrahlungszwecke zur

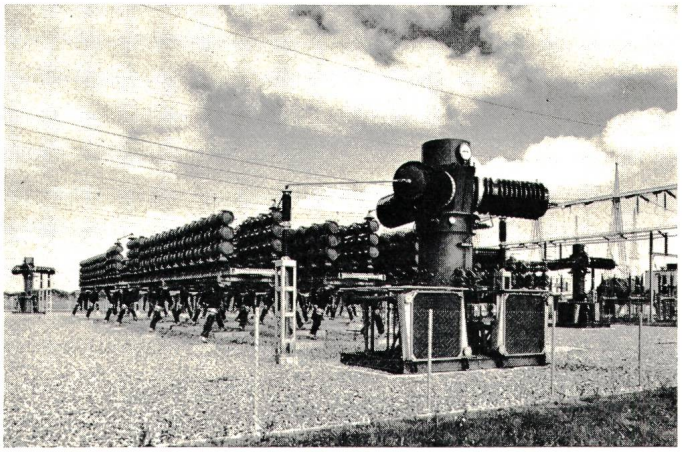

Fig. 14
Filterkondensatoren der Kontiskan-Übertragung Dänemark-Schweden/Elsam, Fredericia

Sterilisation von Lebensmitteln und Medikamenten oder für eine Teilcheninjektion in Ringbeschleunigern und schliesslich für Hochspannungsprüfanlagen (Fig. 15).

In jüngster Zeit sind Greinacher-Kaskaden auch in der Höchstspannungs-Elektronenmikroskopie verwendet worden, um mit Hilfe schneller Elektronenstrahlen das Auflösungsvermögen auf weniger als ein Å — ein zehnmillionstel Millimeter — zu verbessern. Während in den Anfängen der Elektronenmikroskopie Strahlspannungen von höchstens 100 kV üblich waren, werden heute bereits Beschleunigungsspannungen von 1 MV und mehr angewendet. So ist vor einiger Zeit an der Universität Toulouse ein 3-MV-Gerät in Betrieb genommen worden, und in den USA ist eine 5-MV-Anlage in der Planung. Die Erkenntnisse, die sich mit einem derartig höchstauflösenden Höchstspannungs-Elektronenmikroskop erreichen lassen, werden einer Gefügeanalyse hochpolymerer Kunststoffe ebenso wie einem neuartigen biochemischen Strukturdenken zugute kommen und möglicherweise einen besseren Einblick in den genetischen Mikrokosmos vermitteln.

7. Impulsgeneratoren

Um die zwanziger Jahre beginnt auch die Zeit, in der man sich damit beschäftigt hat, den Kondensator mit Hilfe origi-

neller Kunstschaltungen zur Erzeugung hoher Spannungsimpulse heranzuziehen, um auf diese Weise die Möglichkeit zu haben, die in Hochspannungsnetzen auftretenden Überspannungen im Laboratorium jederzeit nachbilden zu können. Es ist *Otto Erwin Marx* gewesen, später Professor für Hochspannungstechnik an der Technischen Hochschule Braunschweig, der im Jahre 1923 auf den glänzenden Gedanken kam, solche Spannungsimpulse dadurch zu erzeugen, dass er Kondensatoren in Parallelschaltung aufladen und dann in Reihenschaltung über durchgezündete Funkenstrecken entladen liess. Diese Vervielfachungsschaltung, mit der in modernster Technik Steilheiten bis zu einigen MV/µs erzeugt werden können, hat sich für manche denkbare Aufgabenstellung bestens bewährt, so dass es heute kaum ein Hochspannungslaboratorium gibt, in dem nicht ein Marxscher Stossgenerator aufgestellt ist. In einigen Hochspannungsprüffeldern sind sogar schon Stossanlagen für 6 MV Summenladespannung und einige hundert kWs in Betrieb, um rechtzeitig in der Lage zu sein, Betriebsmittel eines kommenden 1000/1500-kV-Ultraspannungsbereiches entwickeln und prüfen zu können. Auch die Electricité de France hat sich auf ein solches Zukunftsdenken ausgerichtet und in ihrer grosszügig ausgelegten Höchstspannungshalle in Les Renardières, die anlässlich der letztjährigen CIGRE Tagung offiziell ihrer Bestimmung übergeben worden ist, eine 6-MV-Stossanlage mit 450 kWs speicherbarer Energie aufgestellt. Fig. 16 vermittelt einen grandiosen Einblick in die 195000 m³ umfassende Halle mit dem darin befindlichen 20 m hohen Generator, dessen einzelne Kondensatorstufen über einen 200-kV-Gleichrichter aufgeladen werden können. Von seiner 10 m Abschirmhaube führt eine Rohrverbindung zu einer Kugelelektrode, die an einer 20 m langen Isolierkette an der Hallendecke aufgehängt ist, zu den Doppeltoroiden eines darunter befindlichen Teilers von *Zaengl*. Die riesigen Abmessungen der Halle sind damit zu erklären, dass die elektrische Festigkeit der Luft bei hoher Schaltspannungsbeanspruchung sehr viel kleiner ist als im Bereiche hoher Blitzstossspannungen, was sich in etwa dadurch dokumentiert, dass bei rund 3-MV-Schaltstoßspannung bereits Luftstrecken von nahezu 30 m durchschlagen werden konnten. Dies entspricht einer mittleren Durchschlagfestigkeit von nur mehr 1 kV/cm.

Auf noch höhere Summenladespannungen haben sich die Japaner eingerichtet, in dem sie schon vor einigen Jahren in ihrem Shiobara-Prüfgelände einen 10-MV-Generator aufgestellt haben, der an einem nahezu 40 m hohen Portalgerüst aufgehängt ist, vermutlich wegen der immer zu befürchtenden Erdbebengefahr. Soweit sich aus einer neueren Veröffentlichung von *T. Udo* [22] entnehmen lässt, besteht nunmehr die Absicht, eine 25-MV-Stossanlage für 12000 kWs — also für eine mehr als 10fache Energie — zu bauen, um die Möglichkeit zu haben, eine 500 m lange Versuchsleitung unter höchstmöglicher Beanspruchung prüfen zu können. Diese dann wohl einmalige Experimentieranlage wird aus zwei parallelgeschalteten Stosskreisen bestehen, die ihrerseits aus jeweils zwei in Reihe geschalteten Generatoren für 15 MV/3600 kWs und 10 MV/2400 kWs aufgebaut sein sollen, woraus sich die bereits erwähnte Gesamtenergie ergibt. Alle vier Stossgeneratoren, die insgesamt ein Gewicht von nahezu 800 t haben werden, sollen über riesige Portale abgestützt werden. Damit wird man erstmalig bei einer Spannung von 25 MV eine Elektrizitätsmenge von nahezu 1 Coulomb einspeichern können — ein faszinierender Aspekt phantasievoller Gedanken, die mehr und

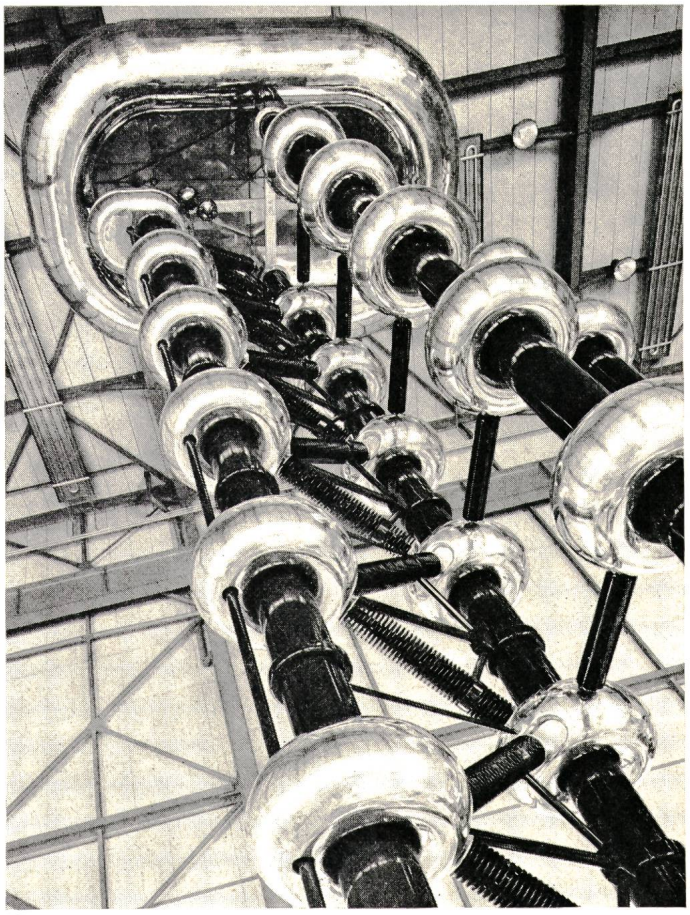

Fig.15
7stufige Greinacher-Kaskade für 2 MV Gesamtspannung und und 20 mA Entnahmestrom

mehr auf eine Konzentration elektrisch gespeicherter Energie ausgerichtet sind.

Im Zusammenhang mit einer optimierten Auslegung mehrstufiger Stossgeneratoren hat sich in jüngster Zeit wiederholt die Frage gestellt, in welcher Weise sich der Spannungsaufbau über die einzelnen Generatorstufen vollzieht, um danach über Massnahmen befinden zu können, die möglicherweise zu einem besseren Betriebsverhalten der Anlage führen. Von dem Gedanken ausgehend, dass ein Marxscher Stosskreis als ein aus Widerstand, Induktivität und Kapazität bestehendes Netzwerk aufgefasst werden kann, hat *F. Heilbronner* in einer kürzlich erschienenen Arbeit [26] ein bemerkenswertes Rechenverfahren entwickelt, das im wesentlichen darauf beruht, die Spannungsverteilung innerhalb des Netzwerkes ohne und mit Berücksichtigung der Funkenstreckenströme zu berechnen, woraus sich die wahren Knotenpunktspannungen durch Superposition ergeben. Mit Hilfe eines hieraus ableitbaren Rechenprogramms lässt sich dann sowohl der Spannungsverlauf an den einzelnen Funkenstrecken als auch der zeitliche Aufbau der impulsförmigen Gesamtspannung rechnerisch bestimmen. In Fig. 17 ist das Ergebnis dieser Rechnung für einen zwölfstufigen 3-MV-Stossgenerator, bestehend aus 120 Netzknotenpunkten, wiedergegeben: Man sieht, dass die Ladespannung von 160 kV nach der Triggerung der ersten Funkenstrecke zum Zeitpunkt Null zusammenbricht, wodurch es zu Überspannungen kommt, die ein Durchzünden auch der zweiten Funkenstrecke zur Folge haben. In dieser Schrittfolge werden nacheinander auch die übrigen Funkenstrecken durchgezündet, und erst wenn alle Funkenstrecken angesprochen haben, kommt es zu einem merklichen Aufbau des Gesamtspannungsimpulses

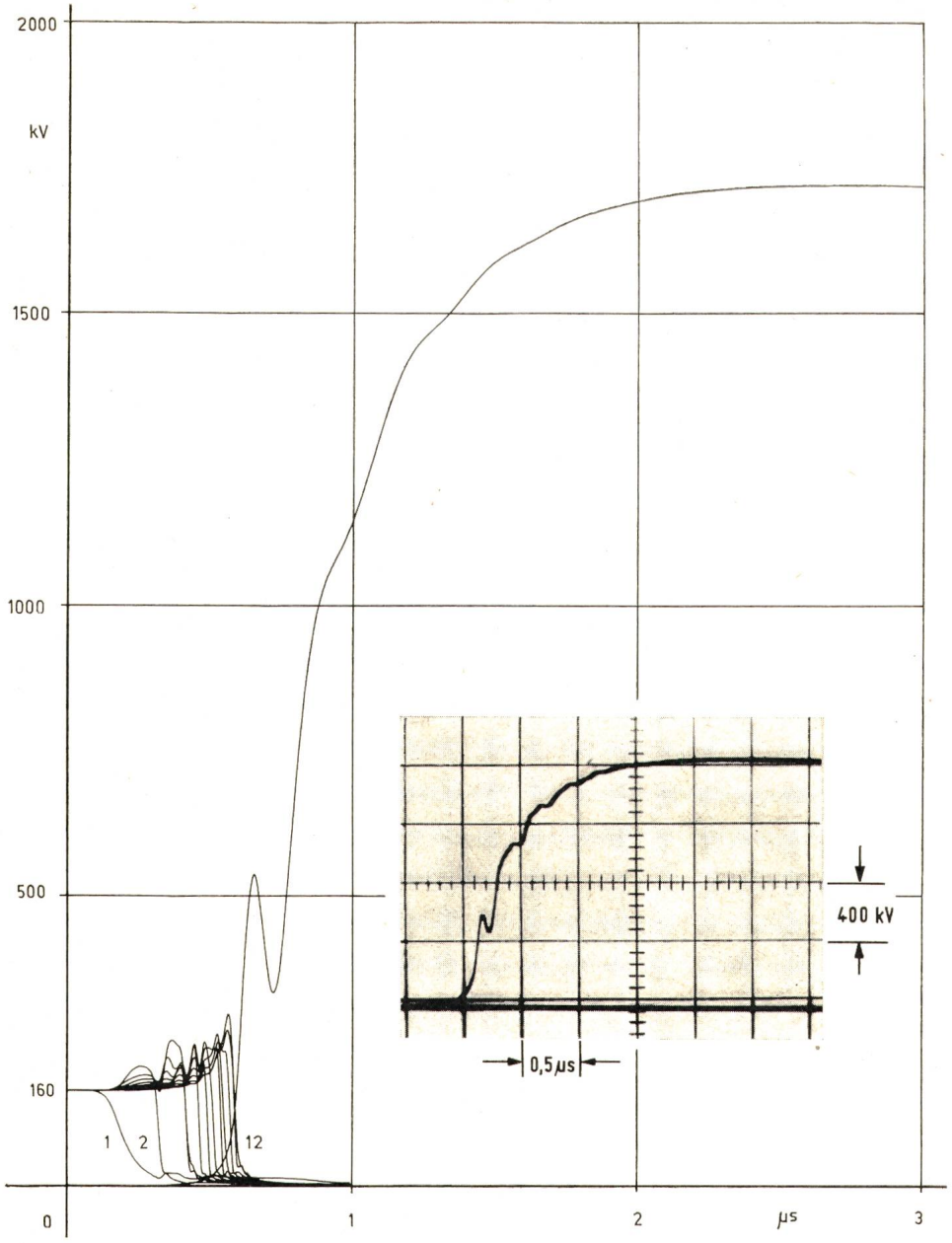

Fig. 17
Errechneter und experimentell ermittelter Spannungsaufbau einer 12stufigen Stossanlage [26]

an der Stossanlage. Ein Vergleich der rechnerisch bestimmten Kurve mit dem oszillographisch aufgenommenen Impuls lässt eine erstaunlich gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment erkennen, insbesondere auch in der getreuen Wiedergabe einer bei etwa 500 kV aufgetretenen Oberschwingung. Nachdem ein Durchrechnen weiterer Stosskreise zu ebenso befriedigenden Ergebnissen geführt hat, kann die technische Brauchbarkeit des Heilbronnerschen Verfahrens wohl als erwiesen betrachtet werden. In Zukunft wird es demnach möglich sein, den Spannungsverlauf einer Stossanlage mit Hilfe eines Digitalrechners sehr schnell vorauszubestimmen und nötigenfalls einer Korrektur zu unterziehen, noch ehe die Anlage gebaut worden ist. Der Vorteil eines solchen Vorgehens ist überzeugend genug, um weitgehend davon Gebrauch zu machen.

8. Steilimpulsgeneratoren

Erfahrungen der jüngsten Zeit haben gelehrt, dass es aus der Sicht einer noch besser adaptierbaren Isolationskoordination wünschenswert ist, wesentlich steilere Spannungsimpulse zur Verfügung zu haben als mit Marxschen Stossgeneratoren bisher erzeugt werden konnten. Professor *Karl Berger* hat nämlich auf Grund seiner langjährigen Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore herausgefunden, dass bei multiplen Blitzentladungen Stromsteilheiten bis zu 80 kA/µs auftreten können [20],was soviel bedeutet, dass bei einem Direkteinschlag in eine Hochspannungsleitung ein nach beiden Seiten sich ausbreitender Spannungsimpuls bis zu 20 MV/µs erwartet werden muss. *J. Wiesinger* kommt auf Grund theoretischer Überlegungen sogar zu der Meinung, dass Stromsteilheiten bis zu 200 kA/µs denkbar sind [19], die korrespondierende Spannungssteilheiten bis zu 50 MV/µs zur Folge haben würden. Bei dieser Sachlage sollte dem Problem einer Prüfung von Hochspannungsgeräten unter Steilstossbeanspruchung sehr viel mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden. Als technische Lösung bietet sich dazu an, den in einem Marx-Generator erzeugbaren Spannungsimpuls über eine schnell durchzündende Funkenstrecke eines Nachkreisspeichers aufzusteilen und danach dem zu prüfenden Objekt zuzuführen. Dazu hat *H. Kärner* in einer ideenreichen Arbeit [21] bemerkenswerte Vorschläge gemacht und dann einen solchen Nachkreis gebaut, mit dem Steilimpulse — wie vorausberechnet — bis zu 50 MV/µs erzeugt werden konnten.

9. Stoßstromanlagen

Mancherlei Gründe haben Veranlassung dazu gegeben, den elektrischen Energiespeicher auch für die Erzeugung hoher Stromimpulse heranzuziehen. Eine sehr starke Initiative in dieser Richtung ist schon immer von dem Wunsche getragen gewesen, die thermischen Wirkungen stromstarker Impulse experimentell analysieren zu können, insbesondere auch im Hinblick auf ihre mögliche technische Anwendbarkeit. Diese Bemühungen haben dazu geführt, dass im Laufe des vergangenen Jahrzehnts leistungsfähige Stoßstromanlagen im Bereiche von 100 kWs speicherbarer Energie entwickelt worden sind. Fig. 18 zeigt eine solche Anlage, die bei gleichbleibender Gesamtenergie von 100 kWs mit Hilfe einer sinnvoll durchdachten Umschalteinrichtung auf 50, 100 und 200 kV eingestellt werden kann, wodurch eine bessere Anpassung an den jeweiligen Verwendungszweck möglich ist. Die inzwischen rasch fortgeschrittene Anwendungstechnik hat sich beispielsweise darauf eingerichtet, mit Hilfe eines unter Wasser erzeugten Stoßstromlichtbogens eine so starke Druckwelle hervorzurufen, dass damit Metalle verformt werden konnten. Interessanterweise haben die in dieser Hinsicht bisher vorliegenden Erfahrungen gezeigt, dass Metalle mit Unterwasserblitzen sehr

Fig. 16
6-MV-Stossgenerator mit 450 kWs speicherbarer Energie in der neuen Höchstspannungshalle der Electricité de France in Les Renardières

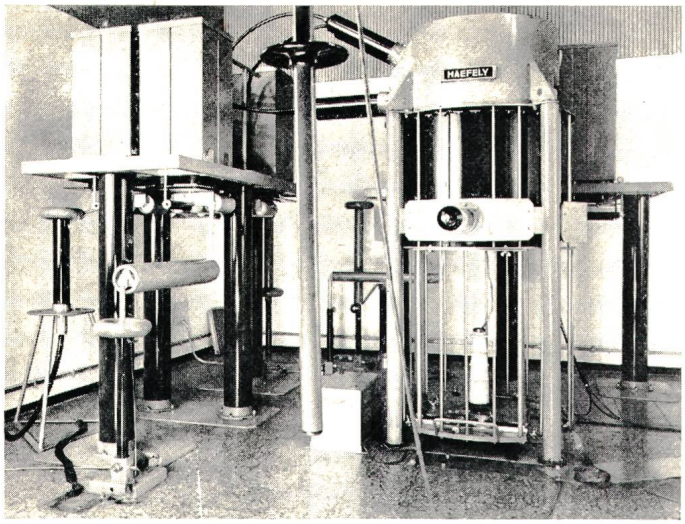

Fig. 18
200-kV-Stoßstromanlage mit 100 kWs speicherbarer Energie [18]

viel gleichmässiger verformt werden können als dies durch eine konventionelle Verformungstechnologie möglich ist. Es ist einleuchtend, dass die Druckwelle noch erheblich dadurch verstärkt werden kann, wenn man den Lichtbogen durch einen dünnen Draht zünden lässt, da dann der eigentlichen Hauptentladung eine Expansion des verdampfenden Drahtes vorausgeht, die druckverstärkend wirksam ist. Der Zünddraht bringt zudem den grossen Vorteil, dass die Lichtbogenlänge und damit die in der Entladungsstrecke umgesetzte Energie wesentlich vergrössert werden kann. Was die sich dabei abspielenden physikalischen Vorgänge anbelangt, so hat *J. Moeller* in einer kürzlich erschienenen Arbeit nachgewiesen [27], dass bei einer Drahtexplosion in Luft im Stromverlauf drei Phasen unterschieden werden können (Fig. 19): Eine Verdampfungsphase I, der sich eine längere Strompause II anschliesst, worauf dann die eigentliche Hauptentladung III einsetzt. Wie aus dem synchron dazu gesetzten Schmierbild hervorgeht, beginnt die radiale Expansion des Lichtbogenkanals erst in der Phase II, um dann nach Erreichen eines Durchmessers von etwa 30 mm in die auch im Schmierbild erkennbare lichtstarke Hauptentladung überzugehen. Aber auch sonst können Stoßstromanlagen manche wertvolle Information vermitteln, wenn es sich beispielsweise darum handelt, die thermischen Wirkungen an den Fusspunkten eines Hochstromimpulses näher zu untersuchen (Fig. 20).

Von ganz besonderer Nützlichkeit aber sollten Stoßstromanlagen für eine bestmögliche Simulation der in der Natur vorkommenden Blitzströme angesehen werden, wozu verständlicherweise sehr leistungsfähige Experimentiereinrichtungen notwendig sind. Derartige Untersuchungen scheinen nicht nur vom wissenschaftlichen Standpunkt, sondern auch aus der Sicht einer besseren Anpassung der Schutzeinrichtungen an die natürlichen Gegebenheiten des Blitzphänomens vordringlich geworden zu sein. Zweifellos würde sich auf diese Weise wenigstens ein Teil der durch zündende Blitzschläge verursachten Brandschäden vermeiden lassen, die allein in der Bundesrepublik Deutschland jährlich einige 10 Millionen DM betragen. Demgegenüber haben die bisherigen Laboratoriumserfahrungen erkennen lassen, dass die derzeit vorhandenen synthetischen Experimentieranlagen die natürlichen Blitzströme nur in unzureichendem Masse zu simulieren vermögen, was auch anlässlich der 10. Internationalen Blitzschutzkonferenz in Budapest deutlich zum Ausdruck gekommen ist. Dies zeigt sich vor allem in einer unterdimensionierten Ladungsbereitstellung etwa im Verhältnis von 100:1 sowie in einer ungenügenden Abbildung des Zeitintegrals des Stromquadrates etwa im Verhältnis von 10:1. Auch vom Standpunkt der Einschlaggefährdung von Flugkörpern sollte dem Blitzphänomen mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden, wenn bedacht wird, dass jedes Flugzeug im Mittel jährlich einmal vom Blitz getroffen wird. Offenbar kommt es durch die kantigen Formen der Flugkörper zu so erheblichen Feldstärkeerhöhungen innerhalb eines Gewitterfeldes oder auch in dessen Nähe, dass der Blitzstrahl durch den Flugkörper selbst ausgelöst wird. In dieser Hinsicht ist der zweimalige Einschlag in die Apollorakete 12 kurz nach ihrem Start ein alarmierendes Beispiel, das aber leicht erklärbar ist, wie folgende Überlegung zeigt: Wenn man nämlich davon ausgeht, dass sich die Rakete unter günstigsten Bedingungen in einem als homogen angenommenen Gewitterfeld von etwa 1 kV/cm befunden hatte und der 100 m lange Raketenkörper seiner Gestalt nach als gestrecktes Rotationsellipsoid wirksam gewesen war, dann ergibt die Rechnung, dass die elektrische Feldstärke an den Ellipsoidspitzen als Folge der aufgetretenen Feldkonzentration etwa um das 270-fache überhöht worden ist. Es steht ausser Zweifel, dass eine derartige Beanspruchung zu einem Durchschlag der Luft in Form eines Blitzstrahles führen musste.

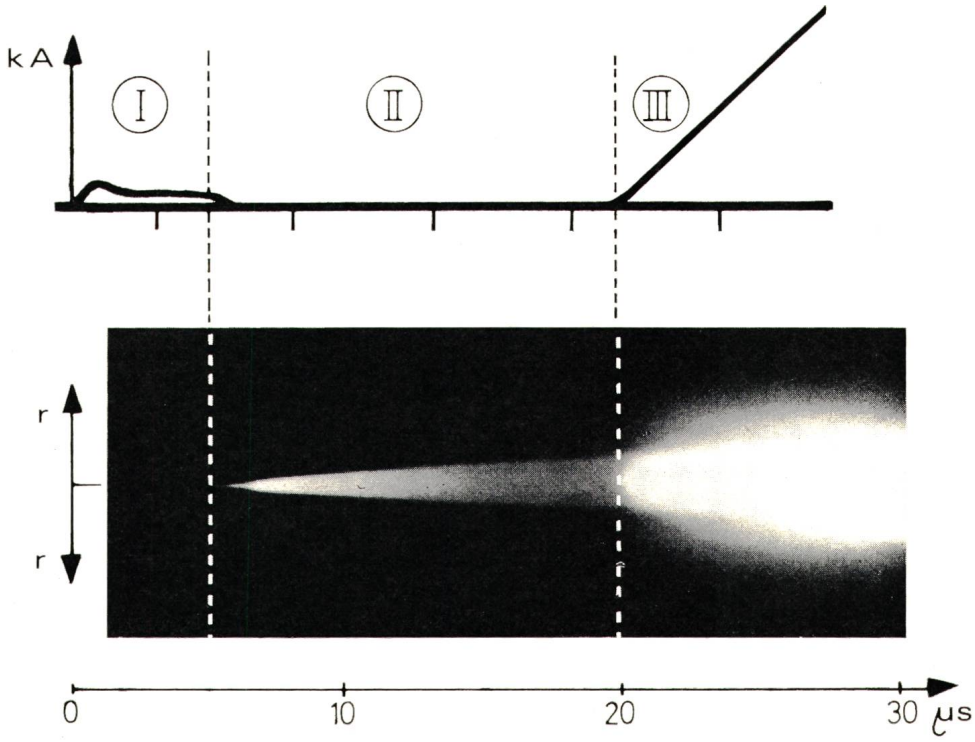

Fig. 19
Zeitlicher Stromverlauf einer Zünddrahtexplosion mit der dazugehörigen radialen Kanalexpansion *r* [27]

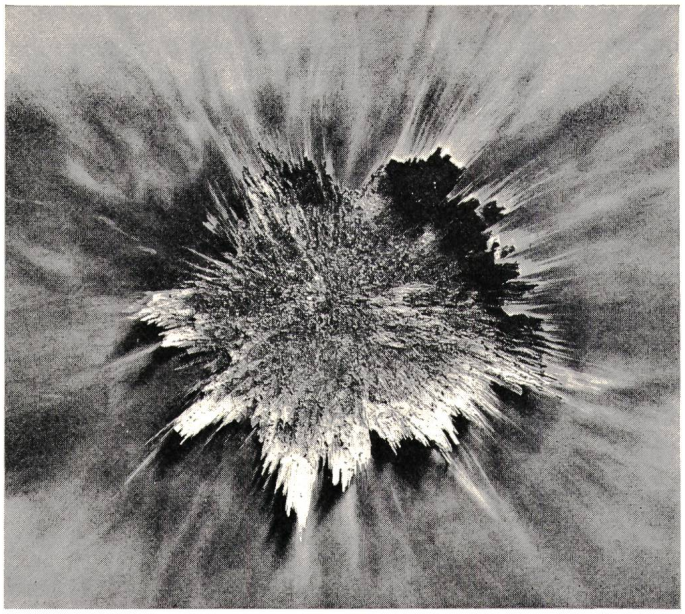

Fig. 20
Bei einem Stoßstrom von etwa 70 kA Scheitelwert eingetretene Aufschmelzungen einer Aluminiumplatte

10. Fusionsgeneratoren

Es ist denkbar, dass der elektrische Energiespeicher seine wohl faszinierendste Anwendung in zukünftigen Kondensatorbänken einer gesteuerten Kernfusion finden wird, deren Vorgeschichte in einer Astrophysik extraterrestrischer Plasmen zu suchen ist. Für eine irdische Simulation von Kernverschmelzungen sind nämlich extrem schnell ansteigende Hochmagnetfelder erforderlich, die das durch Magnetfeldkompression erzeugbare Hochtemperaturplasma genügend lange einzuschliessen vermögen, sei es in linearen oder auch toroidalen Magnetfeldkonfigurationen. Fig. 21 zeigt einen Teil der aus 240 Einzelkondensatoren bestehenden 500-kWs-Kondensatorbank des Institutes für Plasmaphysik in Garching bei München, deren gespeicherte Energie über einen Stromkollektor einer einlagigen Experimentierspule zugeführt wird, in der das Plasma erzeugt und zugleich auch stabil eingeschlossen werden soll. Darüber hinaus verfügt das Garchinger Institut über eine noch leistungsfähigere Anlage mit 2600 kWs und in der Kernforschungsanlage Jülich steht eine 1200-kWs-Bank für Fusionsexperimente zur Verfügung. Aber schon ist in Los Alamos (USA) ein Kondensatorspeicher für 10000 kWs im Bau, und neuere Meldungen aus Moskau besagen, dass man an die Errichtung einer Kondensatorbank mit einer einspeicherbaren Energie von einer halben Million kWs denkt.

Natürlich bleibt abzuwarten, ob es den Plasmaphysikern auf diesem Wege überhaupt einmal gelingen wird, das Problem einer künstlichen Kernfusion wenigstens dem Prinzip nach zu lösen. Professor *Arnulf Schlüter,* wissenschaftlicher Leiter des Garchinger Instituts, hat vor kurzem die zukünftigen Aspekte sehr vorsichtig beurteilt und abschliessend gemeint, dass die in Aussicht genommenen Experimente nur als eine mögliche Chance ernsten Willens zu betrachten seien, «das Feuer der Sonne auf die Erde zu holen». Immerhin konnten in Garching bereits Hochtemperaturplasmen von 60 Millionen Grad erzeugt werden.

11. Der Blumlein-Generator

Es muss als unbestreitbares Verdienst der Plasmatechniker betrachtet werden, auf eine vor nunmehr 30 Jahren angegebene Schaltung von *A. D. Blumlein* aufmerksam gemacht zu haben, die gemäss einem am 10. Oktober 1941 erteilten englischen Patent die Erzeugung von elektrischen Impulsen zum Gegenstand hatte [11]. Dem Prinzip nach handelt es sich dabei um zwei als Kontinuum ausgebildete elektrische Energiespeicher, die über eine Gleichspannungsquelle U aufgeladen und dann durch eine triggerbare Funkenstrecke über einen an den Wellenwiderstand Γ angepassten Belastungswiderstand R_b entladen werden können (Fig. 22), wodurch an diesem ein Rechteckimpuls der Höhe U und der Länge 2τ entsteht, wenn τ die Laufzeit für einen der beiden Speicher bedeutet. Zur Vergrösserung ihrer Wirkung können die beiden Speicher mit einem Isolierstoff höherer Dielektrizitätskonstanten erfüllt sein. Im übrigen bleibt dieses Prinzip auch dann erhalten, wenn das System so gefaltet wird, dass die Oberelektrode b des rechtsseitigen Speichers auf die Oberelektrode a des linksseitigen Speichers zu liegen kommt. Damit könnte man sich einen aus mehreren Stufen bestehenden Blumlein-Generator denken, der — ähnlich wie ein Marx-Generator — über in Reihe geschaltete Funkenstrecken zum Durchzünden gebracht wird, so dass dann eine vervielfachte Spannung am Belastungswiderstand anliegt. Der Vorteil des Blumlein-Generators ist evident, nämlich halbe Anzahl von Zündfunkenstrecken und doppelte Energie einer Stufe.

In Fig. 23 ist eine 250-kV-Anlage dargestellt: Links ist der Isolierstofftank zu sehen, in dem sich das folienisolierte Kontinuum befindet. Daran schliesst sich die Experimentierspule an, und auf der rechten Seite sind die Ladekondensatoren angeordnet. Soweit aus einem von *G. Herppich* verfassten Bericht hervorgeht [23], besteht im Garchinger Institut die Absicht, eine 500-kV-Blumlein-Anlage für zukünftige Fusionsexperimente zu bauen.

12. Explosionsgeneratoren

Gleichsam in Weiterführung der einstigen Nairneschen Drahtexplosionen, die in einer Zeit vor 200 Jahren Erstaunen und Bewunderung zugleich erregt haben, sind seit der ersten Exploding Wire Conference, die im Jahre 1959 in Boston stattgefunden hat, beachtenswerte Anstrengungen zu verzeichnen, mit Hilfe leistungsfähiger Impulsgeneratoren Effekte nachzubilden, wie sie bei Nuklearexplosionen erwartet werden müssen. Zu diesem Zweck bedient man sich einer naheliegenden Technik, eine grosse Anzahl von Marx-Generatoren parallel zu schalten und die darin gespeicherte Energie über einen dünnen Draht zur Explosion zu bringen. Soweit sich aus

Fig. 21
40-kV-Stosskondensatoren der 500-kWs-Kondensatorbank des Institutes für Plasmaphysik in Garching bei München

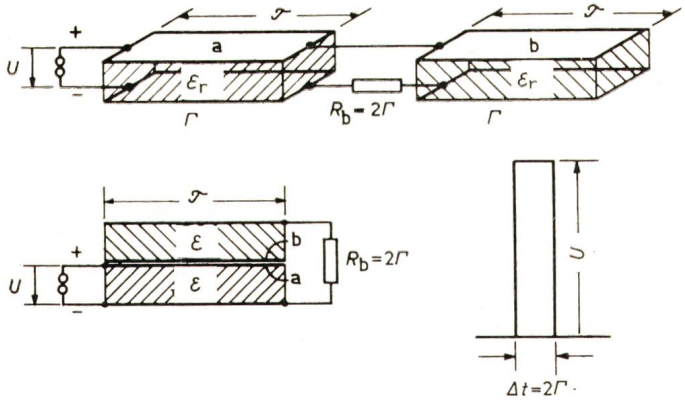

Fig. 22
Prinzipschaltbild eines Blumlein-Generators

der einschlägigen Literatur entnehmen lässt [16], sind erste Schritte in dieser Richtung durch das Zusammenschalten von fünfzehn 320-kV-Generatoren unternommen worden. Neuesten Berichten aus den USA zufolge [28] sollen für die Erzeugung extrem starker elektromagnetischer Wellen sogar 50 Generatoren zusammengeschaltet werden, die in SF_6-isolierter Kompaktbauweise ausgeführt sein werden und von denen jeder eine Energie von 100 kWs bei 2 MV und 10 ns Anstiegzeit abzugeben vermag, so dass mit einem solchen «Kompakt-Marxer» eine Gesamtenergie von 5000 kWs zur Verfügung stehen würde.

Dieser Themenkomplex könnte zu der naheliegenden, wenn auch spekulativen Frage führen, inwieweit eine sinnvolle Kombination von elektrischen Feldern höchster Spannung mit magnetischen Feldern höchster Stromstärke, etwa im Bereiche einiger 10 MV und 10 MA, zu ganz neuartigen Erscheinungsformen eines extrem konzentrierten elektromagnetischen Feldes zu führen vermag. Als faszinierendes Beispiel einer unvorstellbaren Energiekonzentration könnte man sich einen 50-MV-Speicher bei einer Entnahme von 40 MA denken, der bei entsprechender Dimensionierung eines dazu erforderlichen Energiewandlers während einiger milliardstel Sekunden eine Leistung von 2 Milliarden MW abgeben könnte, was der 10000fachen Leistung aller Kraftwerke des derzeitigen westeuropäischen Verbundnetzes entsprechen würde. Sofern diese Leistung in 10 ns freigestellt werden soll, müsste der Speicher eine Energie von 20000 kWs haben.

13. Der Wolkenspeicher

Durch die in einer Gewitterwolke vorhandene Turbulenz kommt es im Verlauf komplexer Prozesse zu einer Ladungstrennung, die nach und nach zu einer riesigen Elektrizitätsanhäufung innerhalb des Wolkenbereiches führt und schliesslich die Bildung eines Wolkenspeichers bewirkt (Fig. 24). Auf Grund von über 1200 Einflügen in Gewitterfronten, die die Amerikaner in den Jahren 1946/47 im Rahmen ihres Thunderstorm Projects [12] veranstaltet haben, weiss man, dass eine Gewitterwolke eine Ladung von einigen 100 Coulomb mitzuführen vermag. Dies würde bedeuten, dass sich bei einer angenommenen Erdkapazität zwischen Wolke und Erde von etwa 1 µF und einer Wolkenladung von 100 C eine Wolkenspannung von 100 MV ergäbe, woraus eine Gesamtenergie von 5 Millionen kWs errechenbar ist, was immer noch mehr als das 1000fache der bisher zum Einsatz gekommenen künstlichen Speicher bedeutet. Damit erklärt sich auch die ungeheure Wirksamkeit eines Blitzstrahles, in dessen Entladungskanal etwa 1000 kWs/m umgesetzt werden.

14. Zukunftsaspekte

Es mag reizvoll erscheinen, mit einigen abschliessenden Bemerkungen die bisherige Entwicklung des elektrischen Energiespeichers kurz zu kommentieren und hieran einige zukunftsorientierte Gedanken anzufügen. Dazu mögen die folgenden geschätzten Zahlenwerte dienen, die sowohl die Gesamtenergie als auch die auf das Gesamtvolumen bezogene Energiedichte des jeweils betrachteten Speichers beinhalten:

	Energie	Energiedichte Ws/m³
Musschenbroeksches Experiment (1745)	0,006 Ws	5
Leydener Flasche (um 1750)	0,05 Ws	20
Leydener Flaschenbatterie nach *Nairne* (1773)	50 Ws	20
Leydener Flaschenbatterie nach *Van Marum* (1795)	600 Ws	30
Leydener Flaschenbatterie von *Ohm* (1840)	50 Ws	54
Reihenkondensatoranlage	220 kWs	520
6-MV-Marx-Generator der EdF	450 kWs	3600
500-kV-Blumlein-Generator	54 kWs	2800
Fusionsgenerator Garching Isar I	2600 kWs	8750
und Isar II	500 kWs	7150
Fusionsgenerator Los Alamos im Bau	10 000 kWs	—
25 MV-Generator Shiobara II geplant	12 000 kWs	—
Fusionsgenerator Garching geplant	50 000 kWs	—
Anlage Moskau geplant	500 000 kWs	—
Wolkenspeicher	5 000 000 kWs	0,05

Diese Übersicht lässt erkennen, dass der elektrische Energiespeicher seit seiner Entdeckung im Jahre 1745 die entscheidende Entwicklung in seinen Dimensionen erfahren hat: Während nämlich die Energie etwa um den Faktor 10^9 angewachsen ist, hat sich die Energiedichte nur im Verhältnis 1:500 vergrössert. Es erscheint deshalb nachdenkenswert, ob nicht durch eine Erhöhung der Energiedichte — etwa durch Anwendung höherer Drücke im Kondensatordielektrikum — wirksamere Impulsanlagen geschaffen werden könnten, denn eine höhere Energiedichte würde verminderten Raumbedarf und damit kleinere Induktivitäten und demzufolge erhöhte Stromsteilheiten zur Folge haben müssen. Es wäre also denkbar, dass eine zukünftige Plasmatechnologie von den Erfahrungen einer Hochdrucktechnik erfolgreichen Gebrauch machte.

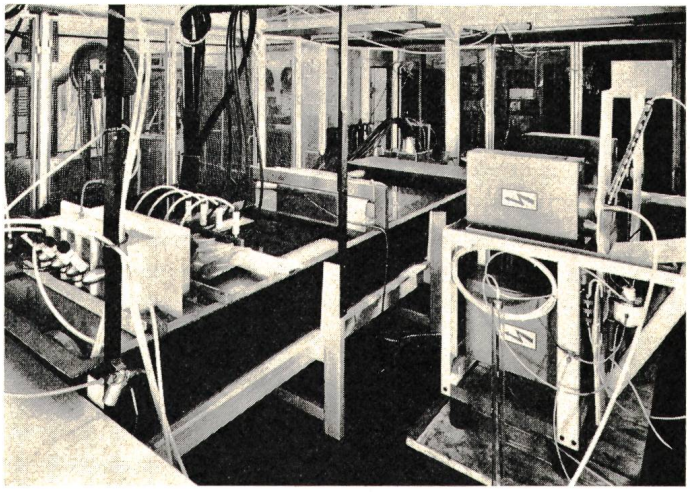

Fig. 23
250-kV-Blumlein-Generator mit Ladekondensatoren und einseitig eingespeister Experimentierspule [23]

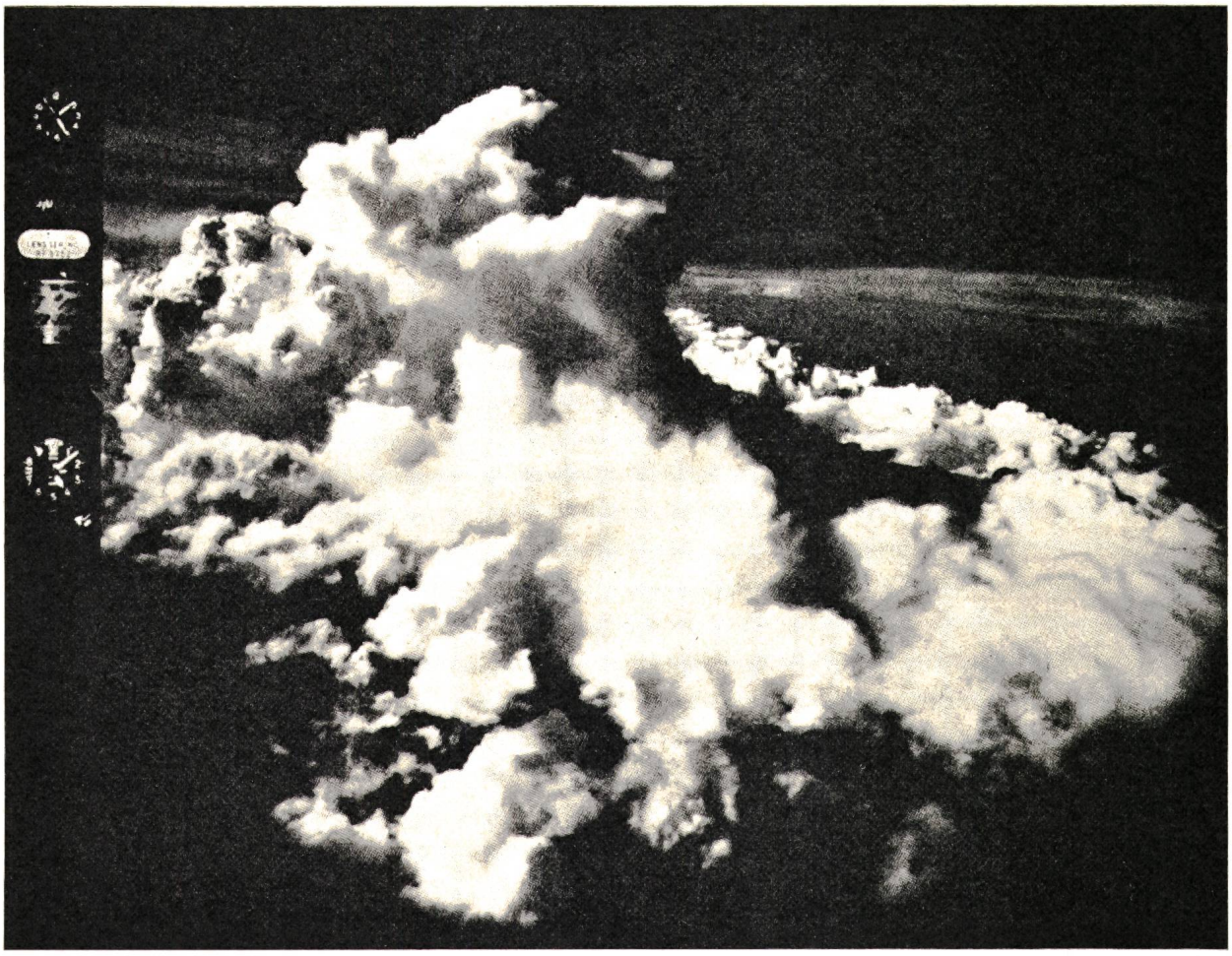

Fig. 24
Gewitterwolke aus 12 000 m Höhe aufgenommen [17]

Was die in Planung befindlichen Anlagen anbelangt, so wird offenbar ein weiteres Anheben der speicherbaren Energie um wenigstens eine Zehnerpotenz für möglich gehalten, im Falle der Anlage Moskau sogar um zwei Zehnerpotenzen, womit sich dann der künstliche Speicher von dem seit unvorstellbaren Zeiträumen existenten Wolkenspeicher [24] nur noch um den Faktor 10 unterscheiden würde.

So manifestiert sich die Entwicklung des elektrischen Energiespeichers mit einigen markanten Phasen über einen Zeitraum von über 200 Jahren hinweg: Sie hat mit erschütternden Experimentierkünsten ihren Anfang genommen und wird in einer nunmehr faszinierend gewordenen Experimentiertechnik weitergeführt mit dem wohl höchsten Ziel, eines Tages das irdische Sonnenfeuer zur Wirklichkeit werden zu lassen.

Literatur

[1] Part of a letter from Mr. Trembley to Martin Folkes concerning the light caused by quicksilver shaken in a glass tube, proceeding from electricity. Philosophical Transactions, Part I, 44(1746), p. 58...60.
[2] An extract of a letter from J. H. Winkler to a friend in London, concerning the effects of electricity upon himself and his wife. Philosophical Transactions Part I, 44(1746), p. 211...212.
[3] *J. H. Winkler:* Die Stärke der elektrischen Kraft des Wassers in gläsernen Gefässen, welche durch den Musschenbroekschen Versuch bekannt geworden. Leipzig, Breitkopf und H., 1746.
[4] *L. Jallabert:* Expériences sur l'électricité avec quelques conjectures sur la cause de ses effets. Genève, Barrillot et fils, 1748.
[5] *Ch. Rabiqueau:* Le spectacle du feu élémentaire ou cours d'électricité expérimentale. Paris, Jombert, Knapen, Duchesne, 1753.
[6] *E. Nairne:* Electrical experiments made with a machine of his own workmanship. Philosophical Transactions Part I, 64(1774), p. 79...89.
[7] *J. A. Donndorff:* Die Lehre von der Elektricität. Erfurt, Keyser, 1784.
[8] *D. Beck:* Kurzer Entwurf der Lehre von der Elektricität. Salzburg, Duyle, 1787.
[9] *Abbé Bertholon de St. Lazare:* Anwendung und Wirksamkeit der Elektrizität zur Erhaltung und Wiederherstellung der Gesundheit des menschlichen Körpers. Bd. 1/2. Weissenfels/Leipzig, Friedrich Severin, 1788/1789.
[10] *K. A. Faulwetter:* Kurze Grundsätze der Lehre von der Elektricität. Teil 3 und 4. Nürnberg, Schmidmer, 1793.
[11] *A. D. Blumlein:* Improvements in or relating to apparatus for generating electrical impulses. Patent Specification 589127 vom 10. Oktober 1941.
[12] The Thunderstorm. Report of the Thunderstorm project. Washington, US Departement of Commerce, 1949.
[13] *C.-F. von Weizsäcker:* Energieerzeugung durch Wasserstoff-Fusion. ETZ-A 79(1958)22, S. 829...836.
[14] *R. Carruthers:* The storage and transfer of energy. In: H. Kolm a. o.: High magnetic fields. Proceedings of the international conference on high magnetic fields 1961. Cambridge/Massachusetts, MIT Press and New York/London, John Wiley, 1962.
[15] *J. Torlais:* Qui a inventé la bouteille de Leyde. Revue d'Histoire des Sciences et de leurs applications. 16(1963)–, p. 211...219.
[16] *W. G. Chace* and *H. K. Moore:* Exploding wires. Vol. 3. New York, Plenum Press, 1964.
[17] *S. C. Coroniti:* Problems of atmospheric and space electricity. Proceedings of the 3rd international conference on atmospheric and space electricity, Montreux, may 5...10, 1963. Amsterdam/London/New York, Elesevier, 1965.
[18] *H. Prinz:* Feuer, Blitz und Funke. München, Bruckmann, 1965.
[19] *J. Wiesinger:* Stoßstromionisierte Funkenstrecken. Dissertation der Technischen Hochschule München, 1966.
[20] *K. Berger* und *E. Vogelsanger:* Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.
[21] *H. Kärner:* Die Erzeugung steilster Stoßspannungen hoher Amplitude. Dissertation Technische Hochschule München, 1967.
[22] *T. Udo:* Forschungsthemen zum Blitzschutz von Leitungen und die dazu nötigen Forschungsanlagen. Tokyo, CRIEPI, 1969 (japanisch).
[23] *G. Herppich:* 500 kV Theta Pinch Projekt. Garching, Institut für Plasmaphysik, 1969.
[24] *H. Prinz:* Nachdenkliches und Belustigendes über das Hochspannungsfeld. Bull. SEV 61(1970)1, S. 8...18.
[25] *H. Bertele* und *J. Mitterauer:* Hochstromtechnik in der modernen Forschung und Entwicklung der Kernfusion. E und M 87(1970)3, S. 139...152, Nr. 6, S. 304...313 und Nr. 7, S. 343...353.
[26] *H. Heilbronner:* Durchzündverhalten und Spannungsaufbau mehrstufiger Stossgeneratoren. Dissertation der Technischen Universität München, 1970.
[27] *J. Moeller:* Zum elektrischen Verhalten von Luftfunkenstrecken unter Stoßströmen. Dissertation der Technischen Universität München, 1970.
[28] *R. A. Fitch:* Low-inductance megavolt pulse generators. Sixth symposium on fusion technology. Aachen, September 1970.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. *Hans Prinz,* Direktor des Institutes für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Universität München, Arcisstrasse 21, D-8000 München.