Zeitschrift: Werdenberger Jahrbuch : Beiträge zu Geschichte und Kultur der Gemeinden Wartau, Sevelen, Buchs, Grabs, Gams und Sennwald

Herausgeber: Historischer Verein der Region Werdenberg

Band: 22 (2009)

Artikel: Elektrizität : vom geheimnisvollen Phänomen zur unverzichtbaren Selstverständlichkeit : fundamentale Entdeckungen und Fortschritte auf dem Feld der Elektrotechnick

Autor: Rebsamen, Roland

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-893455

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: 13.07.2025

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

Elektrizität – vom geheimnisvollen Phänomen zur unverzichtbaren Selbstverständlichkeit

Fundamentale Entdeckungen und Fortschritte auf dem Feld der Elektrotechnik

Roland Rebsamen

Elektrizität, bei uns landläufig einfach als «Strom» bezeichnet (was physikalisch betrachtet falsch ist), ist die Energieform, die aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken ist. Dies vor allem, weil sie technisch relativ einfach an fast jedem beliebigen Ort verfügbar ist. Was aber ist Elektrizität eigentlich?

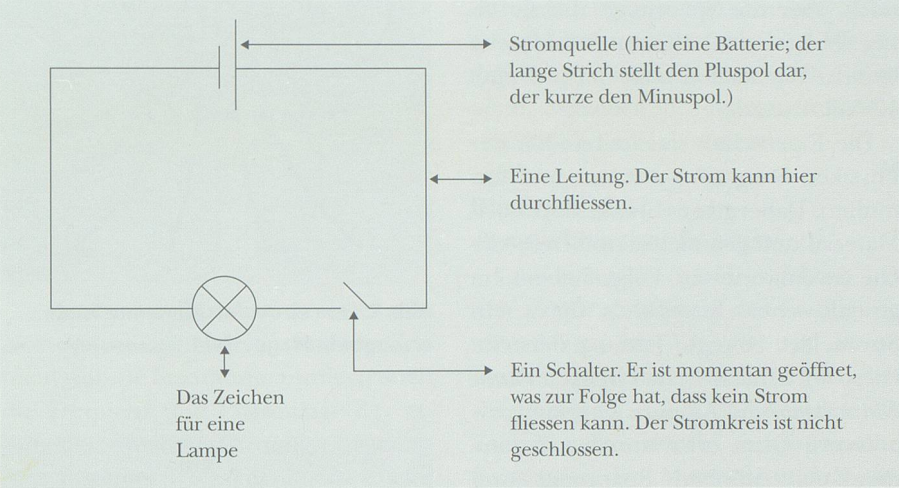

Abb. 1: Elektrischer Stromkreis.

Der Bernstein und der elektrostatische Effekt

Schon die alten Griechen kannten die Elektrizität und haben entscheidend zur Namensgebung beigetragen. Sie stellten fest, dass das Reiben eines Bernsteins – den sie altgriechisch *elektron* nannten – Phänomene erzeugt wie die Anziehung von Haaren oder sogar das Springenlassen von kleinen Funken. Dass es sich dabei um einen elektrostatischen Effekt handelt, wurde aber erst einige Jahrhunderte später von Naturwissenschaftlern erkannt und begründet. Heute versteht man unter dem Überbegriff Elektrizität alle Phänome, die aus ruhender oder bewegter Ladung hervorgehen. Die Ladung setzt sich aus kleinen Elementarladungen zusammen und wird von Elektronen (negativ geladenen Teilchen) oder von Ionen (sie können negative und positive Elementarladungen besitzen) gebildet. Interessant ist, dass solche Ladungen immer ein ganzzahliges Vielfaches einer Elementarladung beinhalten und somit quantisiert sind.

Obwohl es fraglich ist, ob bereits die alten Ägypter die Elektrizität, so wie wir sie heute nutzen, gekannt und auch genutzt haben, erstaunt es, dass bei Ausgrabungen Behälter gefunden wurden, die in Bezug auf die verwendeten Materialien, den Aufbau und die Funktion einer heutigen Batterie sehr ähnlich waren und tatsächlich einen elektrischen Stromfluss erzeugen konnten.

Bis ins 18. Jahrhundert wurde die Elektrizität nur in ihren Phänomenen beobachtet und konnte noch nicht angewendet werden. Erst als *Benjamin Franklin* 1752 als Schutz vor dem spektakulärsten natürlichen Auftreten von Elektrizität den Blitzableiter erfand, war eine wichtige erste technische Nutzung vorhanden. Zu jener Zeit erlangte die Elektrizität enorme Beachtung und wurde von grossen Naturwissenschaftlern analysiert und technisch zugänglich gemacht. Viele Namen dieser Physiker, Chemiker, Mathematiker und Ingenieure finden wir heute in der Begriffswelt der Elektrizität wieder: Ampère[1], Volta[2], Faraday[3], de Coulomb[4], Ohm[5], Gauss[6], Weber[7], Hertz[8], Watt[9] und viele mehr.

Dient ein Element, das einen Ladungsunterschied an den zwei Anschlusspunkten (Polen) erzeugt, als

1 André Marie Ampère (1775–1836), französischer Physiker und Mathematiker.

2 Alessandro Volta (1745–1827), italienischer Physiker.

3 Michael Faraday (1791–1867), englischer Physiker und Chemiker.

4 Charles Augustin de Coulomb (1736–1806), französischer Physiker.

5 Georg Ohm (1789–1854), deutscher Physiker.

6 Carl Friedrich Gauss (1777–1855), deutscher Mathematiker, Astronom, Geodät und Physiker.

7 Wilhelm Eduard Weber (1804–1891), deutscher Physiker.

8 Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894), deutscher Physiker.

9 James Watt (1736–1819), schottischer Ingenieur und Erfinder.

Quelle, kann man die beiden Pole mit Hilfe eines elektrischen Leiters verbinden und so einen Stromkreis schliessen.

Der Ladungsunterschied einer solchen Quelle wurde nach seinem Entdecker *Alessandro Volta* als Spannung mit der Einheit Volt gekennzeichnet. Solche Elemente haben wir heute in Form von Batterien im täglichen Gebrauch und kennzeichnen sie immer noch über die Spannung, die sie im Leerlauf (also im offenen Stromkreis) liefern. Wir kaufen zum Beispiel eine 1,5-Volt-Batterie.

Die Eigenschaft des Leiters hat der Physiker *Georg Ohm* erkannt und formuliert. Dabei gibt es Leiter, die je nach Material und Geometrie unterschiedliche Stromwerte zur Folge haben. Im geschlossenen Stromkreis fliesst ein Strom, der bewegte Ladung darstellt. Diese wird nach dem Physiker *André Marie Ampère* in Ampère gemessen.

Georg Ohm erkannte den Zusammenhang zwischen Spannung und Strom in einem geschlossenen Stromkreis und formulierte die berühmte Ohm'sche Gleichung:

$U = R \cdot I$ U: Spannung in Volt [V]
R: Ohm'scher Widerstand in Ohm [Ω]
I: Strom in Ampère [A]

Zwei grundlegende Effekte

Eine ganz entscheidende Entdeckung war der Zusammenhang von bewegter Ladung (Strom) und magnetischer Wirkung, beobachtbar an zwei Effekten:

- Jeder stromdurchflossene Leiter erzeugt ein magnetisches Feld. Magnetische Wirkung hatte bis dahin nur der Magnet selber erzeugen können. Untersucht haben die Physiker diese Tatsache früher an Kompassnadeln, die sich in Abhängigkeit der Stromstärke und Stromrichtung auslenken liessen.

Die französischen Physiker *Jean-Baptiste Biot* (1774–1862) und *Félix Savart* (1791–1841) haben dieses Phänomen genauer erforscht und Gesetzmässigkeiten erkannt. Mit Hilfe eines Stromflusses und eines geschickt angeordneten Leiters in Form einer Spule liess sich ein magnetisches Feld erzeugen, in welchem ein Eisenstück bewegt werden konnte. Damit gelang es, elektrische Energie in mechanische Energie umzuformen.

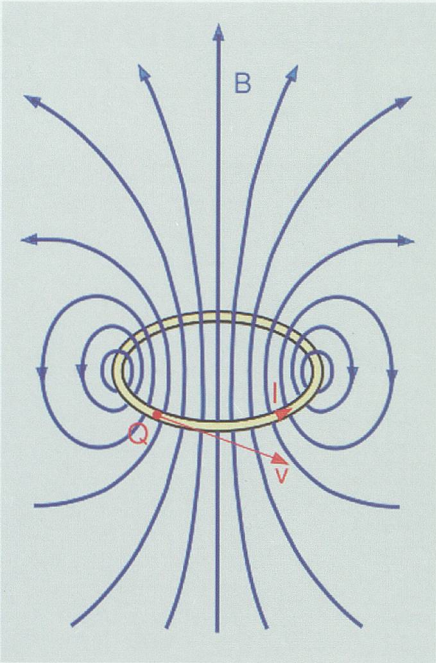

Abb. 2: Eine stromdurchflossene Spule erzeugt ein Magnetfeld. Wikipedia MovGP0

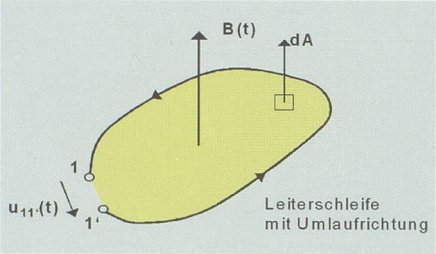

Abb. 3: Elektromagnetische Induktion. Public-Domain-Bild

- Variiert man ein magnetisches Feld durch Bewegung oder zeitliche Änderung, wird in einem Leiter eine Spannung induziert. Diesen Effekt hat der Physiker und Chemiker *Michael Faraday* genauer analysiert und dabei die Gesetzmässigkeiten erforscht. Er zeigte auf, wie sich durch mechanische Bewegung eines magnetischen Feldes eine Spannung erzeugen lässt.

Mit dem Erkennen und Verstehen dieser beiden Effekte war die Voraussetzung zur technischen Nutzung der Elektrizität gegeben.

Aus mechanischer wird elektrische Energie – und umgekehrt

Mit Hilfe eines Generators – zum Beispiel einer Spule, die durch eine Turbine gedreht wird – lässt sich in einem magnetischen Feld eine Spannung erzeugen, die in Abhängigkeit der Drehzahl ein zeitliches Verhalten aufweist. Mehrere Spulen werden geometrisch so angeordnet, dass mittels einer mechanischen Kontaktierung (Kommutierung) eine möglichst gleichförmige Spannung (Gleichspannung) erzeugt wird.

Abb. 4 zeigt einen Gleichstromgenerator aus dem Jahr 1849. Aussen sind die hufeisenförmigen Dauermagnete angeordnet, die ein magnetisches Feld erzeugen, in dem sich ein mechanisch angetriebenes Spulensystem bewegt. In jeder Spule wird eine Spannung induziert, die über eine Bürste so abgegriffen wird, dass eine Gleichspannung resultiert. Ohne die Kommutierung wird direkt eine Wechselspannung erzeugt.

Somit verfügte man Mitte des 19. Jahrhunderts zwar über Komponenten, um mechanische in elektrische Energie umzuformen und umgekehrt, da jede Maschine (Generator, Motor) aber Verluste aufweist, hat man nach solchen Umformungen auf jeden Fall weniger nutzbare Energie zur Verfügung. Deshalb stellt sich die Frage, weshalb die Elektrizität trotzdem so erfolgreich war und sich berühmte Firmen wie Siemens, AEG und Brown Boveri so erfolgreich am Markt platzieren konnten. Der entscheidende Punkt ist, dass man elektrische Energie mittels Kabeln relativ einfach an jede beliebige Stelle bringen kann.

Einen weiteren grossen Schritt machte die Elektrotechnik mit der Einführung des Wechselstroms. Im Nachhinein betrachtet, erstaunt, dass der Wechselstrom seinen Siegeszug erst nach dem Gleichstrom antrat, obwohl die Generatoren Wechselstrom eigentlich

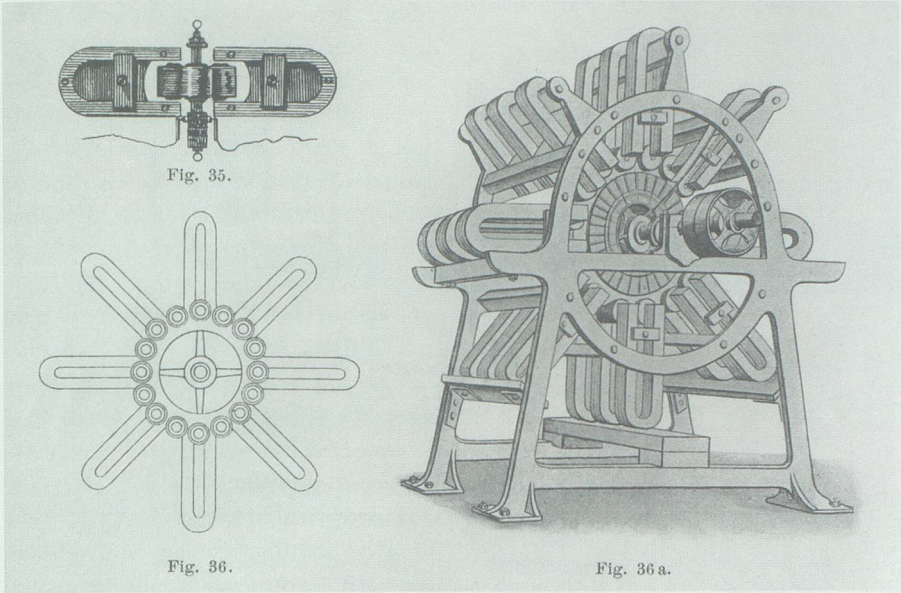

Abb. 4: Gleichstromgenerator von 1849. Public-Domain-Bild

ganz natürlich liefern. Der Grund dafür liegt sicherlich im Wechselstrommotor, der in seinen technischen Eigenschaften doch wesentlich komplexer ist als der Gleichstrommotor. Zudem muss man in einem elektrischen Netz bei mehreren Generatorquellen nicht nur die Spannung, sondern auch die Frequenz und Phasenlage der erzeugten Wechselspannung genauestens abstimmen, was nicht ganz so einfach ist.

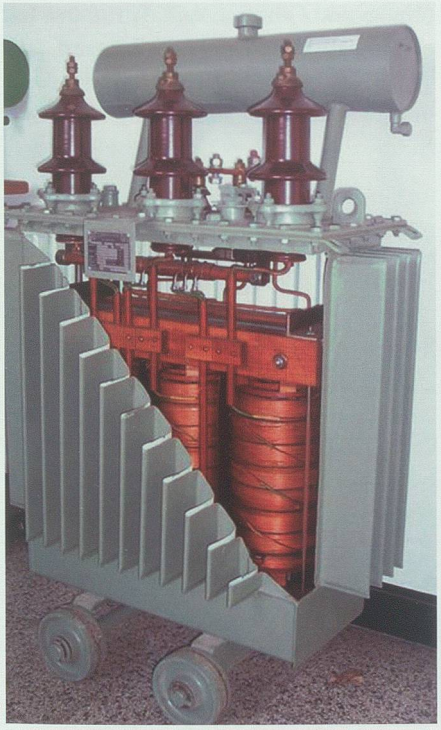

Abb. 5: Blick ins Innere eines Transformators. Wikipedia/GFDL

Die wichtigste Entwicklung Ende des 19. Jahrhunderts war wohl, dass man mittels eines Transformators eine Wechselspannung sehr einfach von einer Spannung auf eine andere anheben oder absenken konnte.

Die Übertragung von elektrischer Energie

Will man elektrische Energie E_{el} von A nach B übertragen, muss man die Leitungsverluste möglichst gering halten.

$$E_{el}(t) = \int_t P_{el}(t)dt$$

$$P_{el} = U \cdot I$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

ρ = spez. Widerstand (Materialeigenschaft)
l = Leiterlänge
A = Leitungsquerschnitt

Da grosse Dimensionen bei Leitungen zu mehr Gewicht führen und Materialien wie Kupfer teuer sind, besteht ein Interesse daran, die Verbindung zwischen A und B mit möglichst wenig Leitermaterial herzustellen. Deshalb muss man versuchen, mit einem möglichst kleinen Strom I zu arbeiten, da jedes Leitermaterial nur einen bestimmten spezifischen Stromfluss führen kann, ohne sich zu stark zu erwärmen oder sogar sich zu zerstören. Somit muss man, um die gleiche Energie transportieren zu können, die Spannung U entsprechend erhöhen. Dies ist der Grund, weshalb man auch heute noch Netzebenen mit unterschiedlichen Spannungen verwendet.

Die Erzeugung von elektrischer Energie

In den letzten hundert Jahren hat sich am Grundprinzip der Erzeugung von elektrischer Energie und deren Verteilung wenig geändert. Was sich aber dauernd ändert, ist die eingesetzte Technik, die durch technologische Fortschritte im Material- und Steuerungsbereich beeinflusst wird.

Wenden wir uns nachfolgend den verschiedenen Techniken der Elektrizitätserzeugung zu.

Wasserkraft

Dass man mittels Wasserkraft einen Generator antreiben kann, ist naheliegend und wird mit sehr unterschiedlichen Turbinentypen realisiert.

Wasserkraft wird als «neue erneuerbare Energie» eingestuft, da sie aus dem natürlichen Wasserkreislauf gespiesen wird.

Thermische Kraftwerke

Eine sehr weit verbreitete Technik ist die Nutzung der thermischen Energie, wie sie bei einem Verbrennungsprozess bei Gas- und Kohlekraftwerken oder beim Kernprozess in Kernkraftwerken entsteht. Neu kommt die Geothermie dazu, die die Wärme des Erdinnern nutzt.

Das Prinzip ist dabei immer dasselbe: Mittels Wärmeenergie wird Wasser verdampft und auf eine Dampfturbine ge-

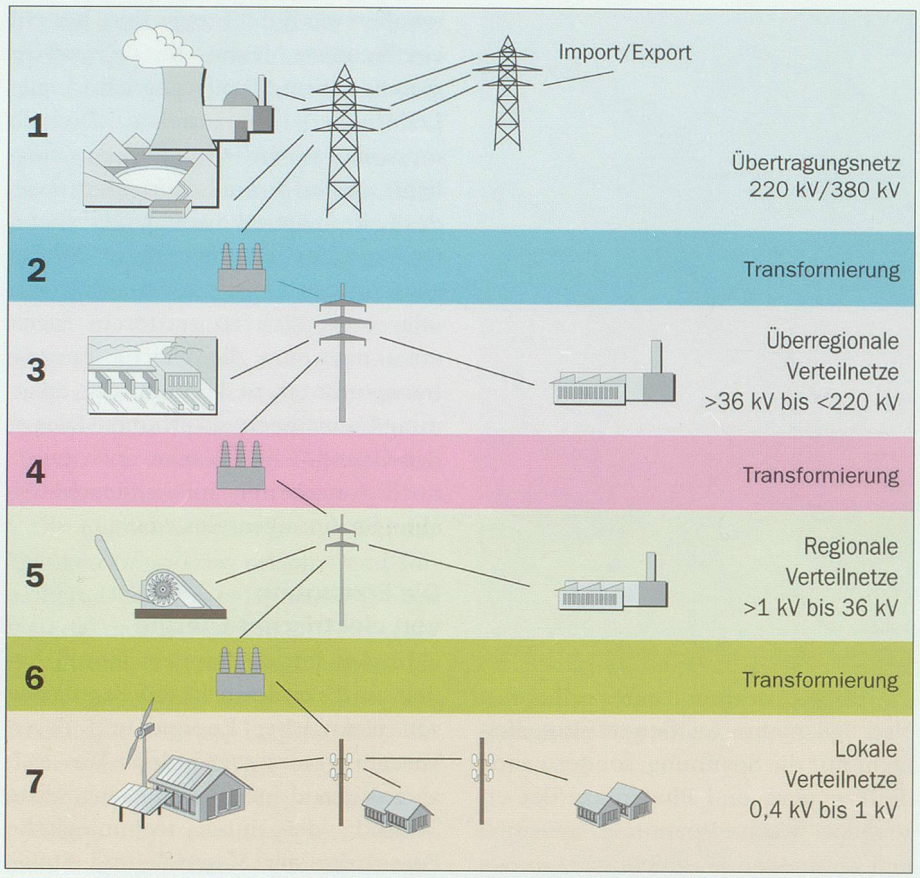

Abb. 6: Schematische Darstellung der Netzebenen mit unterschiedlicher Spannung. VSE/AES

führt, die einen Teil dieser Energie in mechanische Energie umformt. Über einen Generator wird dann elektrische Energie produziert.

Bei einem thermischen Prozess ist entscheidend, dass möglichst viel Wärmeenergie genutzt werden kann. Rein physikalisch ist der Wirkungsgrad der Energieumformung von thermischer auf elektrische Energie begrenzt und kann maximal 60 Prozent betragen. Die restliche Energie liegt in Form von Abwärme vor, wovon ein Teil für Heizzwecke in einem Fernwärmenetz genutzt werden kann, was den Gesamtwirkungsgrad der Anlage noch erhöht.

Ein grosses Thema bei thermischen Anlagen ist die CO_2-Belastung, die bei Verbrennungsprozessen entsteht. Eine Ausnahme bilden thermische Kraftwerke, die mit Holz beheizt werden. Dieser Brennstoff wird als CO_2-neutral gewertet, weil der Baum bei seinem Wachstum CO_2 verbraucht und Sauerstoff abgegeben hat und zudem im natürlichen Verrottungsprozess dieselbe CO_2-Menge freisetzen würde wie bei der Verbrennung.

Die Geothermie ist praktisch CO_2-frei und nimmt diesbezüglich eine absolute Sonderposition ein. Weil man bei der Geothermie die Erdwärme nutzt, sind Erdbebengebiete die idealen Standorte für solche Anlagen, da man dort schon bei geringer Bohrtiefe auf warme Schichten trifft. Dass man durch spezielle Verfahren auch Erdbeben auslösen kann, musste das Pilotprojekt in Basel 2007 mit einem Baustopp bezahlen. Die Zukunft dieser Anlage ist weiterhin ungewiss.

Biogasanlagen fallen ebenfalls in die Sparte von thermischen Kraftwerken, da auch dort über den thermischen Prozess Strom erzeugt wird.

Kernkraftwerke sind ebenfalls CO_2-neutral. Bei dieser Art der Energieerzeugung scheiden sich aber die Geister. Die grosse Problematik liegt im radioaktiven Abfall und in der Gefahr einer technischen Panne, bei der Radioaktivität austreten kann. Die sichere Endlagerung radioaktiven Abfalls stellt dabei ein Problem dar, das technisch an sich lösbar ist. In der Schweiz ist die Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) seit Jah-

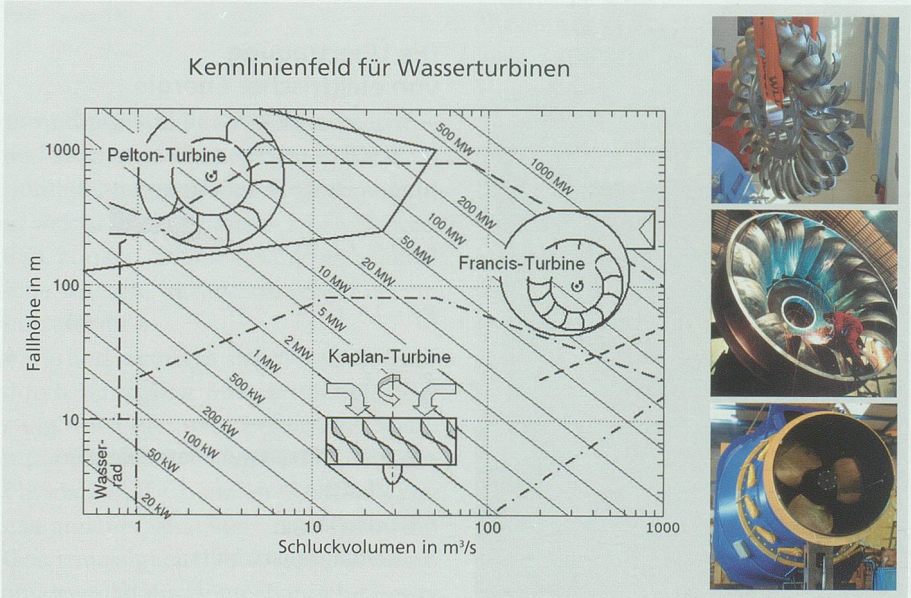

Abb. 7: Kennlinienfeld für Wasserturbinen. Rechts von oben: Pelton-Turbine, Francis-Turbine, Kaplan-Turbine. Wikipedia/GFDL/Public-Domain-Bild

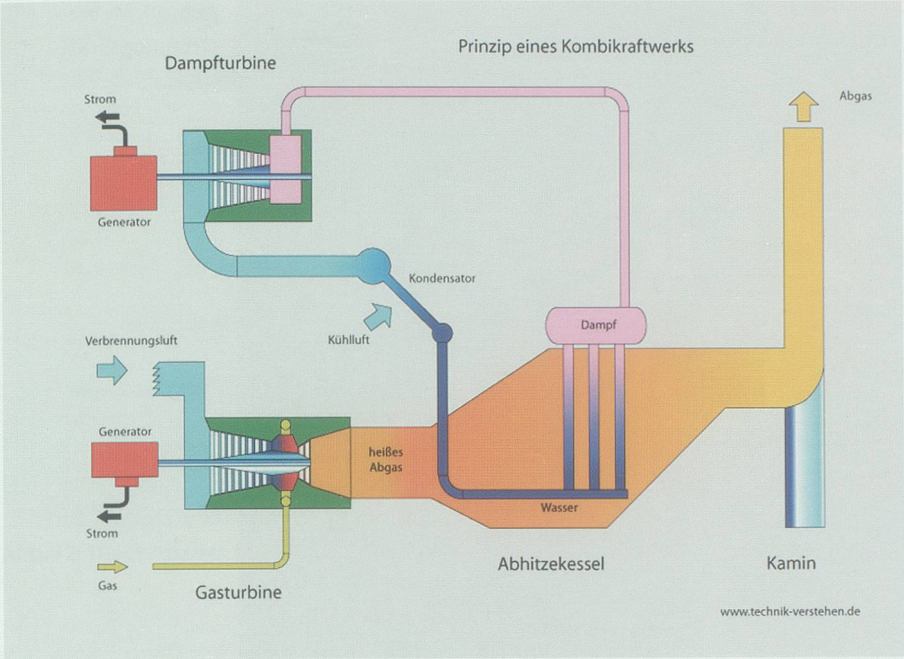

Abb. 8: Funktionsschema eines Gas-Kombikraftwerks. Wikipedia/GFDL

ren darum bemüht, eine Endlagerstätte zu evaluieren und zu verwirklichen – bisher aus politischen Gründen jedoch erfolglos.

Absolute Sicherheit gibt es bei keinem technischen System, und Radioaktivität hat die Eigenschaft, dass es, wie das Beispiel der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl (1986) zeigt, bei einer Freisetzung zu einer grossen geografischen Ausdehnung kommen kann und die Belastung sehr lange anhält.

Windkraft

Bei der Nutzung der Windkraft ändert sich eigentlich nur das Medium. Speziell bei der Nutzung der Windkraft ist aber, dass man keine technische Einrichtung benötigt, um den Wind zu erzeugen oder zu kanalisieren. Die Windkraft erlebt eine Renaissance und ist bei vernünftiger Nutzung eine wertvolle Energiequelle.

Wie jedes System hat auch ein Windkraftwerk seine negativen Seiten. Ein grosses Problem ist der sogenannt stochastische Energieanfall (man weiss nicht, wann wie viel Energie erzeugt wird). In einem elektrischen Netz, wo der Verbraucher einfach Strom bezieht, wenn er ihn benötigt, führt das zu einer oberen Grenze der steuerbaren Erzeugung und setzt Energiespeicher wie Pumpspeicherkraftwerke voraus. Diese Grenze liegt in der Grössenordnung von etwa 20 Prozent, die noch lange nicht erreicht sein wird.

Ein weiterer problematischer Punkt ist die optische und akustische Belastung. Bei Off-shore-Anlagen haben die akustischen Belastungen im Meer dazu geführt, dass Fische sich dort nicht mehr aufhalten. Grund ist der Ultraschall, den die grossen Masten erzeugen.

Dass bei der Windkraftanlage wirklich nur das Medium ändert, zeigen die neusten Visionen, gemäss denen ganz ähnliche Anlagen zur Nutzung von Meeresströmungen eingesetzt werden.

So genial diese Vision auf den ersten Blick erscheint, ist auch hier die Frage nach den Folgen zu stellen. Was geschieht, wenn die Meeresströmung sich ändert? Immerhin sind die Meeresströmungen der Motor des Weltklimas!

Bei allen bis hierher erwähnten Kraftwerken wurde für die Stromerzeugung immer der Weg über eine mechanische Bewegung gewählt. Weil jede Energieumformung Verluste mit sich bringt, sollte man versuchen, elektrische Energie auf möglichst direktem Weg zu erzeugen.

Photovoltaik

Licht, eine elektromagnetische Welle im höheren Frequenzbereich, wird bei der photovoltaischen Methode in einer Solarzelle zu einem Teil in Elektrizität umgeformt. Dabei erzeugt die Zelle eine von der Lichtintensität, dem Ein-

Abb. 9: Windfarm in Mecklenburg-Vorpommern. Foto Hans Jakob Reich, Salez

Abb. 10: Meeresströmungskraftwerk. Abenteuer Wissen

strahlwinkel und dem Materialaufbau abhängige Gleichspannung. Auf der gesamten Erde liefert die Sonne diese Energie.

In der Region Werdenberg kann bei optimaler Ausrichtung der Solarzellen mit folgender Faustformel die Stromproduktionsabschätzung einer Photovoltaik-Anlage gemacht werden: Elektr. Energieproduktion/Jahr = 1000 mal installierte Peakleistung. Eine 4-kWp-Photovoltaikanlage mit polykristallinen Zellen liefert somit im Mittel rund 4000 kWh elektrische Energie, was für eine kleine Familie mit geringem Stromverbrauch ausreicht.[10]

Bereits 1893(!) wurde die erste Solarzelle auf Selenbasis zur Erzeugung von elektrischer Energie gebaut. In der Zwischenzeit wurden verschiedene Solarzellen entwickelt mit dem Ziel, möglichst wettbewerbsfähig Strom zu erzeugen. Da das bisher verwendete Halbleitermaterial Silizium sehr teuer ist, geht die heutige Entwicklung in Richtung Dünnschichtsolarzelle, um mit möglichst wenig Material bei möglichst geringer Prozesszeit und Prozessenergie produzieren zu können. Hierfür sind hochkomplexe Produktionsanlagen erforderlich, in deren Herstellung die Firma Oerlikon Solar in Trübbach weltweit führend ist.

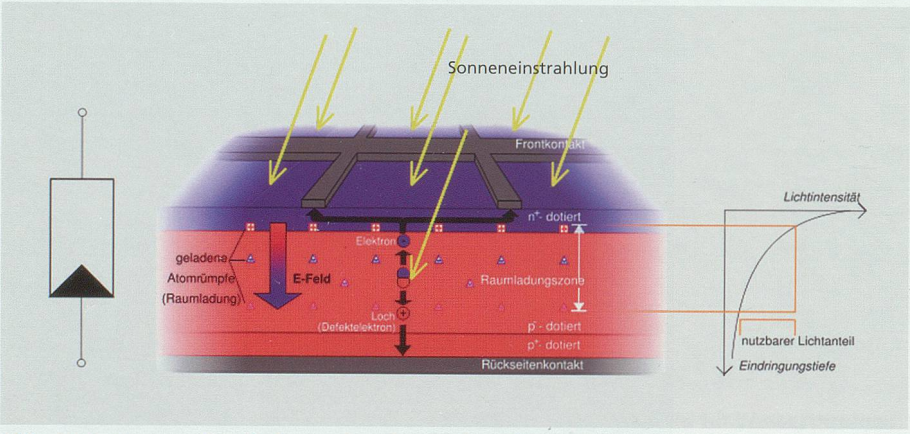

Abb. 11: Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle. Wikipedia

Funktionsweise einer Solarzelle

In einer Solarzelle wird in einem Halbleiterübergang durch die eingestrahlte Lichtenergie das Ladungsgleichgewicht verschoben, so dass an den elektrischen Kontakten eine Gleichspannung abgreifbar wird. Ein Halbleiterübergang besitzt wegen der unterschiedlichen Dotierung des Siliziums eine Raumladungszone. Diese Zone entsteht, weil die Natur immer versucht, Unterschiede auszugleichen.

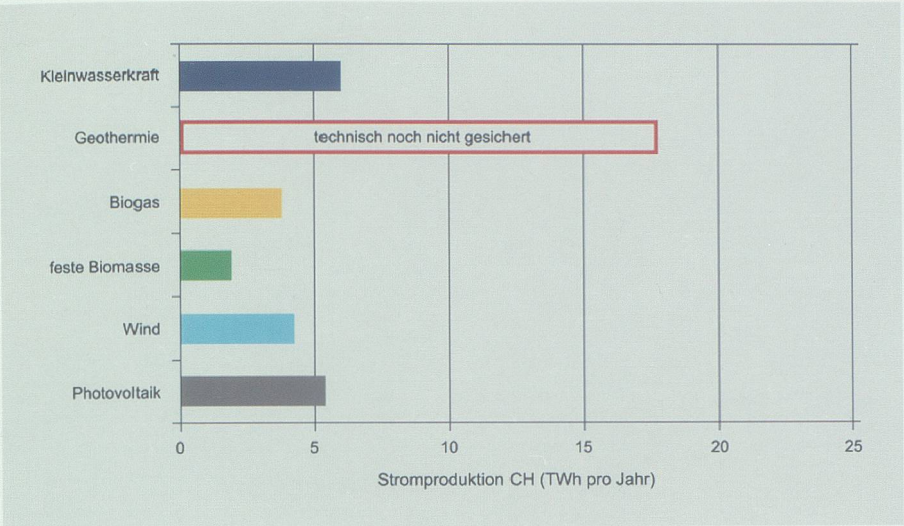

Abb. 12: Theoretisches Potenzial der neuen erneuerbaren Energien. Axpo-Studie

Weil dabei Ladungen verschoben werden, entsteht eine sogenannte Diffusionsspannung, die durch Photonen (Licht) beeinflusst wird. Die Gleichspannung einer Solarzelle wird durch Serieschaltung mehrerer Zellen auf zirka 90–100 V gebracht und heute oft mit einem Wechselrichter ins öffentliche elektrische Netz eingespiesen.

Der Spruch, «die Sonne schickt keine Rechnung», ist sicher richtig, aber die Infrastruktur, die eine solche Umformung ermöglicht, hat ihren Preis. Heute gilt: 1 kWp kostet zirka 10 000 Franken.

Eine wichtige Grösse bei allen Energieerzeugungsarten ist die sogenannte graue Energie. Sie sagt aus, wie viel Energie aufgewendet werden muss, um das System herzustellen und zu installieren. Bei modernen Dünnfilm-Solarzellen ist es so, dass diese Zelle etwa zwei Jahre Energie wandeln muss, um seine graue Energie zu kompensieren.

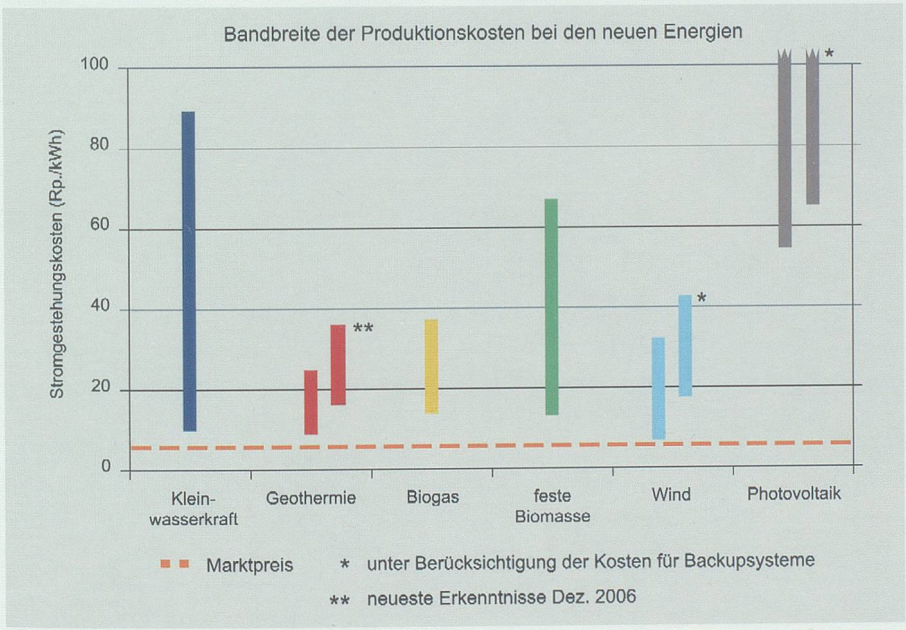

Abb. 13: Bandbreite der Produktionskosten der neuen erneuerbaren Energien. Axpo-Studie

Zusammenfassung

Elektrische Energie ist eine Energieform, ohne die unser heutiger Alltag nicht möglich wäre. Mit dem Klimawandel gewinnt diese Energieform noch zusätzlich an Bedeutung, da sie sehr effizient umgeformt werden kann und in verschiedensten neuen Technologien vorausgesetzt wird. Als Beispiel sei hier die Wärmepumpe aufgeführt, mit welcher sich mittels eines Viertels elektrischer Energie die restlichen drei Viertel Wärme aus der Wärmequelle (Luft oder Wasser) zum Heizen nutzen lassen. Somit substituiert elektrische Energie die fossilen Energieträger und trägt massiv zur CO_2-Reduktion bei.

Jede Art von Energieerzeugungsanlagen muss sich über den Preis behaupten. Deshalb müssen einige Technologien über Förderbeiträge angeschoben werden, um über die Menge und den Rationalisierungsaspekt wettbewerbsfähig zu werden. Eine Studie der Axpo zeigt sehr schön das Potenzial und die Kosten je kWh für die neuen erneuerbaren Energien auf (Abb. 12). Dabei ist zu beachten, dass sich in keiner Studie die Lebensqualität in Franken richtig abbilden lässt.

In den letzten Jahren hat sich in der Politik und in der Gesellschaft in Sachen nachhaltiger Energiebetrachtungen einiges bewegt. So hat sich die ETH-Vision der 2000-Watt-Gesellschaft durchgesetzt und wird nun durch die zusätzliche Vision 1-Tonne-CO_2-Gesellschaft noch breiter abgestützt.

Einen kleinen Wermutstropfen hat diese Erfolgsgeschichte: Der Haupttreiber ist der hohe Preis für Öl und Gas und nicht die Einsicht, dass man etwas verändern muss. Immerhin aber wirkt sich dieser finanzielle Druck in die richtige Richtung aus – und das ist letztlich das Wichtigste.

10 Für genauere Berechnungen siehe den Solardach-Rechner unter: www.swisssolar.ch

Foto Hans Jakob Reich, Salez

Imalschüel/Sevelen: Altsessbach; oben rechts der Bildmitte links beim Bach die EWB-Fassung der Felsspaltquelle.