

Zeitschrift für angewandte Chemie

I. Band, Seite 209—224

Aufsatzeit

27. April 1915

Die Energiequellen unserer Maschinen.

Festrede, gehalten am 27. Januar 1915 in der Technischen Hochschule Hannover
von MAX BODENSTEIN.

(Eingeg. 17./2. 1915.)

Wenn in dieser gewaltigen Zeit ein Chemiker — wie ich es bin — für eine akademische Rede nach einem Thema Ausschau hält, so liegt es nahe, ein solches zu wählen, das mit dem Kriege in unmittelbarem Zusammenhang steht. Nicht nur, weil er es ist, der heute alle unsere Gedanken in Anspruch nimmt, so daß daneben höchstens für die notwendige tägliche Arbeit ein bescheidener Platz bleibt, sondern mehr noch deswegen, weil er im höchsten Maße ein Krieg der Technik ist, weil neben der Klugheit der Führer, neben der Tapferkeit der Kämpfenden die technische Ausrüstung der Heere und Flotten den Erfolg bedingt. Und im Rahmen der technischen Ausrüstung nicht zum kleinsten Teil die chemische. Wenn unsere gewaltigen Geschütze mit immer gleicher Sicherheit ihre Geschosse auf ungeheure Entfernung schleudern, wenn die Geschosse am Ziel ihre verheerenden Explosionen erleiden, und zwar streng nach dem Willen des Sendenden in der Luft, beim Aufschlag oder erst nach dem Eindringen in eine gewisse Tiefe, so sind es chemische Reaktionen, deren genaue Beherrschung diese Erfolge ermöglicht. Oder wenn die Besatzung eines Unterseebootes stundenlang in engem geschlossenen Raum zu leben und zu atmen vermag — sicherlich nicht unter besonders angenehmen Bedingungen, aber doch ohne Gefahr und ohne Schädigung ihrer Gesundheit —, so sind es chemische Mittel, die diesem Raum den zur Atmung nötigen Sauerstoff zu führen und die ausgeatmete Kohlensäure entziehen.

So wäre es auch verführerisch, den Gegenstand meiner heutigen Rede im Zusammenhang mit dem Krieg zu behandeln. Die Energiequellen unserer Maschinen: wir könnten fragen nach den Kraftquellen all der Beförderungsmittel, die auf der Erde und auf dem Wasser, unter dem Wasser und in der Luft unsere Truppen dem Kampfe zuführen, die ihnen Lebensmittel und all den verschiedenen Kriegsbedarf nachliefern, wir könnten fragen nach den Treibmitteln, die unsere Geschosse und Torpedos befördern, und schließlich nach den Sprengstoffen, die in Geschossen, Torpedos und Minen ihre verheerenden Wirkungen entfalten, denn auch diese sind letzten Endes Maschinen, Vorrichtungen, welche die Kraft unserer Muskeln mit erhöhter Wirkung zu ersetzen bestimmt sind.

Aber eine solche Behandlung des Gegenstandes würde zwei Schwierigkeiten bieten: einmal möchte es nicht im Sinne unserer gestrengen Militärbehörde liegen, all diese Dinge in weiterem Kreise zu erörtern, und andererseits würde ich bei dieser Erörterung auch mehrfach an Punkte gelangen, wo meine Kenntnisse versagen. Nur wenige Ein geweihte wissen, wie weit wir mit diesem und jenem Stoffe vorgesehen sind, dessen Einfuhr aus dem Auslande Schwierigkeiten bereitet, wie weit etwa eine Kraftquelle durch eine andere ersetzt werden muß oder schon ersetzt ist — und ich gehöre nicht zu diesen Eingeweihten.

So will ich mein Thema von einem anderen Gesichtspunkte aus behandeln, nicht von dem der heutigen Kriegsführenden, sondern von dem der künftigen Menschheit, die dauernd Energiequellen für ihre Maschinen gebrauchen wird. Ein solcher Gesichtspunkt ist deswegen von hohem Interesse, weil wir mit den — sagen wir Nahrungsmitteln unserer Maschinen dauernd zehren an Vorräten, die in großen aber durchaus nicht unerschöpflichen Mengen in unserer Erde aufgespeichert sind, und die notwendigerweise einmal zu Ende gehen müssen — um so eher, je mehr sich unsere Technik entwickelt —, es sei denn, daß wir sie ersetzen können

durch andere, die uns in beliebiger Menge zur Verfügung stehen. Denn die Arbeit unserer heutigen Motoren entstammt fast ausschließlich der Verbrennung der Kohle und einiger Öle, die wir den in der Erde lagernden Vorräten entnehmen: mit ihrem Ende müßte das Ende unserer Maschinen und dann wohl auch das Ende der gesamten Menschheit heraufdämmern.

Diese Gefahr hat es früher nicht gegeben, weil die bescheidenen Maschinen vergangener Jahrhunderte mit solchen Kräften gespeist wurden, die dauernd sich ersetzen. Die Kraft des Menschen und der Haustiere genügte für die geforderten Leistungen, auch wenn deren Größe bisweilen noch heute unsere Bewunderung erregt. Vor wenigen Jahren hat mein verehrter Kollege Klein an dieser Stelle mit dem berechtigten Stolz des Ingenieurs einen Vergleich gezogen zwischen dem Bau einer der Pyramiden und dem des Eifelturmes. Dort mußten Tausende von Menschen jahrzehntelang arbeiten, hier genügte eine bescheidene Anzahl Arbeiter und ein Zeitraum von einigen Monaten. Niemand wird den Fortschritt erkennen, und doch: die Menschen, die dort arbeiteten, sind ersetzt, die Kohlen, welche die Eisenschienen des Eifelturmes streckten und an ihren Platz beförderten, sind verbraucht für alle Zeiten.

Doch in bescheidenem Umfang hat man auch neben der Kraft des Menschen und seiner tierischen Gehilfen schon immer zwei Energiequellen benutzt, die sich dauernd ersetzen: die unerschöpflichen Bewegungen von Luft und Wasser. Beide haben von jeher die Arbeit geliefert für bewegliche und für ortsfeste Maschinen: Segelschiffahrt und Fluss Schiffahrt, Windmühlen und Wassermühlen sind wohl nicht sehr viel jünger als die Geschichte des Menschen geschlechts.

Und diese beiden Energiequellen benutzen wir auch heute in erheblichem Maße — die einzigen, neben der Arbeit unserer Muskeln, die unerschöpflich sind. Den Wind meist in wenig veränderten Anlagen, in den ortsfesten Windmotoren, welche Mühlen treiben, häufig auch zum Heben von Wasser, selten für andere Arbeiten verwendet werden, und in den beweglichen Segelschiffen, die sich inzwischen zu recht erheblichen Dimensionen ausgewachsen haben, aber doch im übrigen nichts anderes sind, als die vor 1000 Jahren. Anders mit dem fallenden Wasser: auch hier ist zwar der Hauptunterschied zwischen der guten alten Wassermühle und einem modernen Wasserkraftwerk die Größe der Anlage, aber es sind hier in der Sicherung des ständigen Wasserzuflusses, in der Form der Wasserräder und insbesondere in der Überführung der gewonnenen Energie in elektrische und der dadurch erzielten Möglichkeit der Fernleitung so viele Fortschritte gemacht, daß die Ähnlichkeit zwischen beiden Anlagen doch nur noch eine bescheidene ist. Ja, hier ist auch eine ganz neue Art eines Wasserkraftwerkes entstanden: verdankt man früher die Energie des fallenden Wassers ausschließlich dem Kreislauf, der es aus dem Meere verdampfen, dann auf den Bergen als Regen niedergefallen und nun dem Meere wieder zuströmen ließ, so hat man neuerdings die Gezeiten des Meeres dem gleichen Zwecke dienstbar gemacht: in einigen vorläufig noch bescheidenen Anlagen wird das von der Flut gehobene Wasser benutzt, um bei Ebbe abströmend Arbeit zu leisten.

Nun, diese Gezeitenkraftwerke sind heute kaum mehr als Versuche; aber die Ausnutzung des Gefälles der Flüsse ist in sehr weitem, ständig steigendem Umfang durchgeführt, insbesondere in den Alpenländern, in Skandinavien, in gewissen Teilen der Vereinigten Staaten, wo überall reichliche Mengen Wasser mit starkem Gefälle abfließen, und wo vielfach in den flussdurchströmten Seen natürliche Ausgleichsbecken zur Verfügung stehen. Es ist schwer, über die Menge der in den Wasserkraftwerken gefaßten Energie eine

bestimmte Angabe zu machen, fünf Millionen Pferdekräfte mag annähernd eine richtige Zahl für ihre Leistung sein.

Das klingt gewaltig, und das ist zweifellos auch eine gewaltige Summe von Arbeit, die wir der Natur entnehmen. Aber die so verwertete „weiße Kohle“ ist doch gering gegenüber der schwarzen Kohle, die wir dauernd unter dem Dampfkessel verbrennen. Sie liefert uns ständig eine, natürlich noch weniger genau abzuschätzende Leistung von etwa 100 Mill. Pferdekräften. Und für diesen Verbrauch an Kohle bietet uns die Natur keinen Ersatz: gewisse, große Vorräte lagern im Schoße der Erde, aber sie sind immerhin so beschränkt, daß man auch nur bei gleichbleibendem Verbrauch mit ihrer Erschöpfung rechnen muß in Zeiträumen, die ein paar hundert Jahre — etwa für die englischen Lager — bis ein- oder zweitausend Jahre — etwa für die oberschlesischen — umfassen.

Da drängt sich uns wirklich zwingend die Frage auf: Ist die Art, wie wir die vorhandenen Schätze ausnützen, vernünftig, treiben wir nicht eine Vergeudung, die sich einst an unseren Nachkommen rächen muß? Und wenn ja — können wir sie vermeiden oder wenigstens einschränken?

Um diese Fragen zu beantworten, müssen wir zuerst feststellen, woher denn eigentlich die Arbeit stammt, die wir der Kohle entnehmen. Die Antwort ist einfach: Wir verbrennen die Kohle mit dem Sauerstoff der Luft zu Kohlensäure. Das ist ein chemischer Prozeß, der von selbst verläuft — mit der nötigen Geschwindigkeit, nachdem wir die Kohle einmal angezündet haben —, und jeder solcher von selbst verlaufende Vorgang kann uns ein bestimmtes Quantum Arbeit leisten. Wir messen diese Arbeit gewöhnlich in Form der ihr äquivalenten Wärme, wir sagen, die Verbrennung einer bestimmten Menge Kohle liefert uns so und so viele Wärmeeinheiten und könnte uns daher statt dessen auch die diesen äquivalenten Zahl Einheiten der mechanischen Arbeit — Meterkilogramm oder Pferdekraftstunden — abgeben. Dies ist nicht streng richtig: die freie Energie eines Vorganges, die wir ihm in der Form mechanischer Arbeit entnehmen können, ist nicht identisch mit seiner Gesamtenergie, die wir als Wärme messen. Aber der Unterschied beider — bei manchen Prozessen recht erheblich — ist meistens und besonders in unserem Falle sehr klein, und so können wir die anschauliche Größe, die erzeugte Wärmemenge, beibehalten als Maß für die äquivalente äußere Arbeit, welche die Kohlenverbrennung bei voller Ausnutzung liefern könnte.

Und wenn wir nun damit vergleichen die Arbeit, die sie uns in den Dampfmaschinen wirklich leistet, so ist diese, in den besten Formen der letzteren, die wir heute besitzen, bei überhitztem Dampf und Kondensation des austretenden Dampfes 16%: ein Sechstel der Verbrennungsenergie der Kohle gewinnen wir als Arbeit, fünf Sechstel gehen als Wärme nutzlos verloren. Welchen Raubbau treiben also unsere Dampfmaschinen an den Kohlevorräten! Denken Sie ein Hüttenwerk, das aus dem ihm zugeführten Erz nur ein Sechstel des Metalles ausbrächte, fünf Sechstel mit den Rückständen auf die Halde stürzte: ein solches Verhältnis hat es kaum bei vorgeschichtlichen primitiven Versuchen zur Gewinnung von Kupfer oder Eisen gegeben, heute ist es völlig undenkbar. Und die Energie, die doch ein ebenso wertvoller Gegenstand ist wie irgendein Metall, verschwenden wir andauernd in diesem Maße, allerdings ohne daß uns die Haldenberge unbequem würden; denn die Wärme wird von unserer unendlich großen Umgebung aufgenommen, ohne eine merkliche Temperaturerhöhung derselben.

Wenn unsere hochentwickelte Technik das tut, so kann das nicht wohl eine Nachlässigkeit sein, sondern es muß ein sehr ernster Grund dafür vorliegen. Und der beruht auf dem Umwege über die Wärme, welchen wir in den Dampfmaschinen machen, um aus der schlummernden Energie der Kohle mechanische Arbeit zu erhalten. Die Energie tritt zuerst auf in Form des Wärmeinhaltes der sehr heißen Verbrennungsgase unter dem Dampfkessel, und der Fall der Wärme von dieser hohen Temperatur auf die niedrige des Kondenswassers könnte uns Arbeit liefern ebenso, wie der Fall des Wassers aus einer hochgelegenen Talsperre in den Abflußkanal — freilich mit einer erheblichen Einschränkung, die ich gleich erörtern werde. Von diesem Fall der Wärme

nützen wir aber den ersten Teil überhaupt nicht zur Arbeitsleistung: von der hohen Temperatur der verbrennenden Kohle, etwa 1000°, sinkt sie auf die viel niedrigere des Dampfes herab, ohne weitere Leistung, als daß eben das Wasser verdampft, und der Dampf auf seine Temperatur von höchstens 350° gebracht wird. Erst beim Absinken von dieser Höhe auf die des Kondenswassers, auf etwa 30°, leistet die Wärme Arbeit: vom Gesamtfall um etwa 1000° wird also nur der um etwa 320° ausgenutzt; zwei Drittel sind also schon dadurch verloren, nur ein Drittel kommt noch für Arbeitsleistung in Betracht.

Und dieses letzte Drittel voll in Arbeit zu verwandeln, verbietet uns ein Naturgesetz, vielleicht das wichtigste und in seinen unzähligen Anwendungen in Wissenschaft und Technik vielseitigste Naturgesetz, das wir kennen, der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. Wohl können wir vollständig alle anderen Energiearten in Wärme umwandeln — die eines fallenden Körpers oder eines fahrenden Zuges durch Bremsung seiner Bewegung, die elektrische Energie im Widerstand, die strahlende in einem absorbierenden Körper, die chemische im Calorimeter —, wohl können wir theoretisch vollkommen und praktisch in den meisten Fällen nahezu vollkommen alle anderen Energien incinander vollständig überführen, aber von der Wärme, die von einer höheren Temperatur auf eine niedere absinkt, läßt sich nur ein Teil in Arbeit verwandeln, ein Teil, der um so größer ist, je näher die Temperatur dem absoluten Nullpunkt liegt. Und dieser absolute Nullpunkt liegt noch 273° unter dem unserer gewöhnlichen Celsiusskala, dem Gefrierpunkt des Wassers, noch 300° unter der Temperatur des Kondenswassers, und so kann auch das letzte Drittel des Wärmefalles in der Dampfmaschine nur in beschränktem Maße in Arbeit umgesetzt werden.

Was ich für die Dampfmaschine ausgeführt habe, gilt auch, allerdings etwas gemildert, für unsere Explosionsmotoren, sei es, daß sie leichte Öle, Benzin u. dgl., vergasen und in Mischung mit Luft im Zylinder explodieren, sei es, daß sie schwere Öle in die hocherhitzte Luft im Zylinder einspritzen und so zu plötzlicher Verbrennung bringen. Wohl ist der Teil des Wärmefalles, der hier für die Arbeitsleistung zur Verfügung steht, größer als in der Dampfmaschine, wohl gelangt man daher hier zur besseren Ausnutzung der Verbrennungsenergie der Treibmittel — bis etwa 33% im Dieselmotor —, aber auch hier gilt, wie für die Kohlenverbrennung und die Dampfmaschine: Die Ausnutzung der Verbrennungsenergie ist auch hier längst keine ideale, die Energieerzeugung auch in diesen Motoren ist ein Raubbau an den Öl-vorräten, die uns die Erde bietet.

Wie können wir nun diese Verschwendungen einschränken? Gibt es Wege, um die in der Kohle oder im Öl schlummernde chemische Energie nahezu vollständig in Arbeit umzusetzen, oder ist gar die Möglichkeit vorhanden, völlig andere Energiequellen zu erschließen, die sich ebenso dauernd ersetzen wie Wind und fallendes Wasser? Beide Fragen können wir grundsätzlich bejahen, für die erste haben wir schon vielversprechende Ansätze für ihre Lösung, für die zweite noch nicht.

Bei der ersten Frage handelt es sich also um das Problem, die chemische Energie der Kohlverbrennung vollständig in mechanische Arbeit überzuführen. Daß das auf dem Umwege über die Wärme nicht möglich ist, sahen wir eben. So ersetzen wir die Wärme durch eine gefügigere Energieform, durch eine solche, die verlustlos aus der chemischen entsteht und verlustlos in mechanische umgewandelt werden kann — verlustlos immer in dem Sinne, daß nicht ein Teil der verschwindenden Energieform in Wärme übergeht.

Diesen Dienst leistet uns die elektrische Energie: in sie können wir die chemische vollständig verwandeln, sie können wir im Elektromotor vollständig in Arbeit umsetzen, natürlich theoretisch, in der Praxis immer mit kleinen Verlusten: völlig ohne Reibung läuft keine Maschine, ein paar Prozent der Energie gehen bei jeder Umwandlung als Wärme verloren.

Über die Umwandlung der elektrischen Energie in Arbeit brauche ich mich nicht auszulassen: der Elektromotor ist ein Instrument, mit dem heute jedermann vertraut ist, dessen Wirkungsgrad auf 90% und mehr gebracht werden.

kann. So brauche ich nur darzulegen, wie wir die Kohlenverbrennung zur Erzeugung elektrischer Energie verwenden können.

Dazu wollen wir eins der gebräuchlichen galvanischen Elemente betrachten, das Daniellelement, das uns auch heute im Zeitalter der Akkumulatoren noch die hauptsächlichste Betriebskraft unserer Telegraphen liefert. Ein solches Element besteht aus einem Zinkblech, das in verd. Schwefelsäure taucht, und einem Kupferblech in Kupfervitriollösung, beide Flüssigkeiten getrennt durch irgendein Mittel, das ihre Durchmischung verhindert. Verbinden wir den Kupferpol mit dem Zinkpol, so fließt durch den Verbindungsdräht elektrischer Strom, wir können dem Element elektrische Energie entnehmen. Ihre Quelle finden wir bei Beobachtung der chemischen Vorgänge im Element; wir sehen, daß das Zink als solches verschwindet, d. h. als Zinkvitriol in Lösung geht, während sich eine äquivalente Menge Kupfer aus dem Kupfervitriol als Metall abscheidet. In Summa also ein einfacher chemischer Vorgang: Zink + Kupfervitriol gibt Kupfer + Zinkvitriol. Den Vorgang können wir auch ohne Elemente stattfinden lassen, indem wir Zink in Kupfervitriollösung tauchen, ein ganz analoger, Eisen + Kupfervitriol gibt Kupfer + Eisenvitriol, wird in großem Maßstabe technisch durchgeführt, um z. B. in den Rio-Tinto-Minen in Südspanien das Zementkupfer zu gewinnen. Es spielt sich also ein Vorgang im Element ab, der ebenso von selbst verläuft, wie die Verbrennung der Kohle, ihre Vereinigung mit Sauerstoff zu Kohlensäure.

Lassen wir ihn nicht im Element stattfinden, sondern wieder durch direkte Mischung von Zink und Kupfervitriollösung, so gibt er uns Wärme, für ein bestimmtes Quantum Zink eine ganz bestimmte Wärmemenge, findet er im Element statt, so erscheint an Stelle der Wärme die elektrische Energie, und zwar liegt, auf Grund sehr genauer Messungen, auch hier wie bei der Kohlenverbrennung die Sache so, daß die Wärmeentwicklung im ersten Falle sehr nahe gleich ist, richtiger äquivalent der im zweiten gelieferten elektrischen Energie: wir können auch hier sehr nahe die Wärmeentwicklung als Maß für die Arbeitsfähigkeit des Vorganges benutzen.

Um nun an Stelle der Wärme elektrische Energie zu erhalten, war nichts weiter nötig, als aus den Materialien, die sich umsetzen sollen, ein galvanisches Element zu bauen, und das bedeutet, den Vorgang in zwei örtlich getrennte Teile zu zerlegen: am Zinkpol geht Zink in Zinkvitriol über, am Kupferpol scheidet sich aus Kupfervitriol Kupfer ab. Diese Trennung genügt, um aus dem turbulenten chemischen Vorgang ein geordnetes galvanisches Element zu machen.

Das ist also auch für die Kohlenverbrennung auszuführen: an dem einen Pol müßte Kohle in irgendeinem Lösungsmittel sich lösen, an dem anderen müßte der Sauerstoff der Luft dasselbe tun, und das Kohlenelement oder, wie man es allgemeiner bezeichnet, das Brennstoffelement wäre fertig.

So ganz einfach ist das nun freilich nicht auszuführen. Zink und Kupfer im Daniellelement leiteten den elektrischen Strom, so daß wir ihn dem Element entnehmen konnten. Die Kohle, die wir von den Zechen erhalten, tut das nicht, und ein Stab von Sauerstoff oder Luft läßt sich noch viel weniger herstellen und würde auch viel weniger leiten. Aber das sind konstruktive Schwierigkeiten, keine prinzipiellen, und sie sind durch eine Reihe von Laboratoriumsapparaten überwunden, von denen der erfolgreichste wohl der meines Kollegen Bauer in Zürich ist. Die Kohleelektrode ist hier ein Kohlenstab, wie wir ihn in den Bogenlampen und auch sonst vielfach in Elektrotechnik und Elektrochemie benutzen, der den Strom gut leitet. Die Sauerstoffelektrode ist geschmolzenes Silber, das den Sauerstoff der Luft reichlich auflöst, und die Flüssigkeit zwischen beiden ist geschmolzener Borax. In einem solchen Element vollzieht sich der verlangte Vorgang: die Kohle auf der einen, der Sauerstoff auf der anderen Seite verschwinden, das Verbrennungsprodukt, die Kohlensäure, entweicht, und die Energie des Vorganges wird erhalten als elektrische, die wir zwischen Kohleelektrode und Silberelektrode abnehmen können.

Freilich ist ein solches Element vorläufig nur ein Laboratoriumsapparat, und es gibt eine Schwierigkeit, die auch bei weitgehender praktischer Durchbildung diesen Kohle-

elementen immer anhaften wird: was die Zechen liefern, ist kein Kohlenstoff, es ist Kohle mit recht erheblichen Mengen Asche. Diese verbrennt nicht, sie wird vielmehr den Elektrolyten unseres Elementes störend verunreinigen. Aber diese Schwierigkeit ist von geringer Bedeutung; wir können die Kohle vergasen, indem wir Luft und Wasserdampf darüber blasen. Dann erhalten wir brennbare Gase, die nahezu die gleiche Verbrennungswärme besitzen, wie die Kohle, aus der sie entstanden sind. Wir würden dann also ein Element zu bauen haben mit zwei Gaselektroden: Bogenlampenkohle etwa würde von diesem Gase umspült, das geschmolzene Silber von Luft, und auch hier würde die Verbrennung des Gases unter Lieferung elektrischer Energie vor sich gehen.

Ja, diese Elemente sind wohl die aussichtsreicheren. Denn man kann sie auch aufbauen mit wässrigen Lösungen als Elektrolyten an Stelle des geschmolzenen Borax und dann natürlich auch mit einem Ersatz für das geschmolzene Silber. Viele Vorschläge sind dafür gemacht, viele Laboratoriumsapparate hat man gebaut, und es ist auch, insbesondere von Haber, der sehr exakte Nachweis geführt worden, daß solche Elemente tatsächlich ihre ganze freie Energie in Form von elektrischer hergeben. Das Ergebnis all dieser Arbeiten ist, daß es grundsätzlich möglich ist, durch Brennstoffelemente die Kohlenverbrennung vollständig zur Erzeugung elektrischer Energie auszunutzen.

Freilich ist von dieser prinzipiellen Erkenntnis bis zur praktischen Ausführung der Sache noch ein langer Weg, trotz aller Laboratoriumsversuche und trotz sehr zahlreicher Patente, die auf Brennstoffelemente erteilt sind. Dafür gibt es zwei Gründe. Der eine liegt in den bisher versuchten Ausführungen des Gedankens: die Elemente arbeiten alle zu langsam. Die Technik braucht nicht nur große Energiemengen, sondern sie braucht sie auch in angemessenen Zeiten, sie braucht große Leistungen, und die würden die bislang gebauten Brennstoffelemente erst hergeben, wenn man sie in überwältigend großen Dimensionen ausführte. Der andere Grund liegt tiefer, liegt in dem ganzen Problem der Ersparnis an Kohle: wir fühlen das Bedürfnis noch nicht, hier hauszuhalten, so lohnt es sich praktisch noch nicht, den Brennstoffelementen allzuviel Arbeit zu widmen. Wird dieser Grund einmal hinfällig, so wird auch bald eine praktisch brauchbare Form des Elementes erscheinen. Wer Gelegenheit hat, zu verfolgen, mit welcher Schnelligkeit sich unsere Industrie heute auf die Bedingungen einstellt, die durch den Krieg und die beschränkte Zufuhr von Rohstoffen geschaffen sind, wie z. B. die chemische Technik trotz knapperwerden des Chilesalpeters Salpetersäure und Sprengstoffe zu erzeugen vermag, der wird daran keinen Augenblick zweifeln.

Nur einen Grund zum Zweifeln gibt es vielleicht: es ist denkbar, daß wir die Brennstoffelemente nicht mehr nötig haben, daß einer gründlicheren Ersparnis an Kohle die Wege geöffnet sind, ehe die Kohlennot uns zu erhöhter Sparsamkeit zwingt, daß wir Wege gefunden haben, überhaupt ohne Kohle und Brennstoff unsere Maschinen zu betreiben mit Energiequellen, die nicht an beschränkte Lager gebunden sind.

Einen dieser Wege haben wir ja schon besprochen: die Ausnutzung des Windes und des fallenden Wassers. Aber der wird niemals imstande sein, so viel Arbeit zu liefern, wie unsere Technik braucht. Der immer unregelmäßige Wind kommt dafür gar nicht in Frage; das fallende Wasser nutzen wir heute mit vielleicht 5 Mill. Pferden aus, und wir können schätzen, daß in den Kulturländern etwa das Fünffache, auf der ganzen Erde vielleicht das Zehn- oder Zwanzigfache noch an nicht ausgebauten Wasserkräften vorhanden ist. So würde die ganze Erde im höchsten Falle so viel Arbeit liefern können, wie wir heute schon der verbrennenden Kohle entnehmen. Mögen also noch recht erhebliche Fortschritte hier möglich sein, daß jemals alle industrielle Arbeit von Wasserkräften geleistet werden wird, dürfen wir nicht erwarten.

So ist für den Ersatz ein anderer Weg zu suchen. Wir finden ihn bei der Verfolgung der Frage, woher denn in letzter Instanz die Kohle, ja woher auch die Wasserkräfte stammen. Beide fließen aus derselben Quelle, aus den un-

geheuren Energiebeträgen, welche uns ständig von der Sonne zugestrahlt werden. Bei den Wasserkräften ist das ohne weiteres einleuchtend: die Sonnenwärme verdampft das Wasser des Meeres, die Sonnenwärme hebt die wasserdampfgesättigte Luft und führt sie dem Lande und den Gebirgen zu, wo sich das Wasser niederschlägt, um dem Meere wieder zuströmend seinen Kreislauf zu vollenden.

Aber auch unsere Kohlelager entstammen der Energie der Sonne, freilich nicht der, die wir heute zugestrahlt erhalten, sondern der, die sie uns vor vielen Jahrtausenden sandte. Denn die Kohlelager sind untergegangene Wälder, die vor einigen Millionen Jahren durch geologische Vorgänge verschüttet wurden, und die Wälder verdankten ihre Entstehung dem Sonnenlicht.

Daß die Kohlen vermoderte Pflanzen sind, ist ja lange bekannt: die vielfach in ihnen unverkennbar erhaltene Struktur des Holzes und eine Menge anderer Gründe haben uns das längst zur Gewißheit gemacht. Ja ganz kürzlich ist es auch einem unserer Kollegen, dem Privatdozenten unserer Hochschule, Dr. Bergius, gelungen, die Umwandlung von Holz in Kohle im Laboratorium nachzubilden. Natürlich die in Steinkohle, die in die wesentlich anders zusammengesetzte Holzkohle ist ja ein alltäglicher Vorgang. Die Umsetzung, die in den mäßigen Temperaturen der Erdoberfläche in den ungeheuren geologischen Zeiten sich abspielte, kann in einigen Stunden durchgeführt werden, wenn man Holz in Wasser auf 350° erhitzt, wobei natürlich Drucke von mehreren hundert Atmosphären auftreten und zu beherrschen sind, und das so entstandene Produkt hat völlig die Eigenschaften und die Zusammensetzung der Steinkohle.

Auch daß die Wälder, aus denen die Kohlen sich bildeten, zu ihrem Wachstum der Sonnenstrahlung bedurften, ist eine durchaus geläufige Tatsache, die wir ja täglich an unseren heute wachsenden Pflanzen beobachten können, ohne daß wir es nötig hätten, uns über den Vorgang des Pflanzenwachstums weitere Gedanken zu machen. Aber erst ein sehr eingehendes Studium dieses Vorganges — das heute trotz außerordentlich vieler Arbeit längst nicht abgeschlossen ist — läßt uns verstehen, welche Rolle das Sonnenlicht hier spielt.

Wir können vom Pflanzenwachstum etwa dies sagen: das Material, aus dem die Pflanze ihre Substanz aufbaut, ist das Wasser und die Kohlensäure, die zu einigen hundertstel Prozent in der Luft sich findet. Diese Stoffe werden von ihren grünen Teilen aufgenommen unter Entwicklung von Sauerstoff und unter Entstehung der Substanz der Pflanze, die wir als Stärke bezeichnen wollen, ohne damit zu fordern, daß sie mit der uns bekannten Stärke ganz identisch sein soll. Das ist der Vorgang, der in so wunderbarer Weise die Zusammensetzung unserer Luft konstant hält. Tiere und Menschen brauchen zur Atmung Sauerstoff und atmen Kohlensäure und Wasserdampf aus. Wir würden in unserer ungeheuren Atmosphäre erstickeln — genau wie die Besatzung eines Unterseebootes in ihrem beschränkten Raum, wenn nicht bei uns durch das Pflanzenwachstum, bei ihnen durch künstliche Mittel, die Kohlensäure weggenommen, und der Sauerstoff regeneriert würde.

Es vollzieht sich also an diesen Stoffen ein dauernder Kreislauf: die Pflanze verbraucht Kohlensäure und Wasser und bildet Sauerstoff und Stärke — in dem angedeuteten etwas weiteren Sinne —, die Lebewesen verbrauchen zu ihrer Ernährung und Atmung Stärke und Sauerstoff und geben dafür Kohlensäure und Wasser von sich. Aber dies Bild des Kreislaufs ist unvollständig: es fehlt die Energie, die, selbst kein Stoff, doch bei jeder Stoffumsetzung Umwandlungen erleidet. Suchen wir sie beim Lebewesen, so finden wir, daß dies durch die Ernährung, d. h. durch die Umwandlung von Stärke und Sauerstoff in Kohlensäure und Wasser in den Stand gesetzt wird, Arbeit zu leisten und Wärme an die Umgebung abzugeben, genau ebenso, wie wir im Laboratorium durch direkte Verbrennung von Stärke mit Sauerstoff Wärme erhalten können, und nicht nur qualitativ ebenso, sondern auch quantitativ ebensoviel.

Dann aber ist der notwendige Schluß für die Pflanze der, daß in ihr die Umkehrung unseres Ernährungsvorganges, die Umkehrung der Verbrennung der Stärke nur dann stattfinden kann, wenn eine genau gleiche Menge Energie von

außen hinzutritt zu Kohlensäure und Wasser. Erst unter dieser Voraussetzung können sie wieder Stärke und Sauerstoff bilden, und diese Voraussetzung wird erfüllt durch die Absorption des Sonnenlichts, insbesondere seiner gelben und roten Strahlen, im Chlorophyll, in dem grünen Farbstoff der Pflanzen.

Wie sich dabei die Umwandlung des Lichts in die chemische Energie der entstehenden Produkte vollzieht, das wissen wir noch ganz und gar nicht, aber sicher wissen wir, daß nur im Licht die Umsetzung stattfindet, daß die Menge der gebildeten Stärke und des Sauerstoffs der Menge des absorbierten Lichtes streng proportional ist, und seit kurzem auch, daß wahrscheinlich die Menge des absorbierten Lichts genau gleich ist der Wärme, welche die gebildete Stärke bei ihrer Verbrennung liefern kann, so daß wir die verbrauchte Sonnenenergie vollständig in der chemischen Energie der gebildeten Produkte wieder erhalten.

Sicher ist daher, daß das erste Produkt des Pflanzenwachstums, das wir als Stärke bezeichnen haben, seine Existenz dem Verbrauch der Energie der Sonnenstrahlung verdankt. Ohne weitere Energiezufuhr setzte es sich dann in freiwillig verlaufenden Vorgängen in Holz und schließlich in Kohle um. Was wir also in unserer Kohle zur Arbeitsleistung benutzen, ist nichts anderes als in chemische Energie umgesetzte Lichtenergie, welche die Sonne von Jahrtausenden unserer Erde zustrahlte.

Sollte es da nicht möglich sein, auch die uns heute noch dauernd zugesandte Energie des Sonnenlichts in Arbeit umzuwandeln? Ungeheuer sind die Beträge dieser Energie, sie gehen weit über das hinaus, was selbst eine stark vermehrte Technik jemals brauchen würde. 100 Mill. Pferdestärken leisten etwa unsere heutigen Arbeitsmaschinen, 200 Billionen strahlen uns dauernd von der Sonne zu. Freilich verteilen die sich über die ganze Erdoberfläche, über Länder und Meere, schwankend in ihrer Intensität nach der Entfernung vom Äquator und nach den Jahreszeiten, und es kämen für ihre Ausnutzung wohl nur einige bevorzugte Gegenden in Betracht. Aber ihre Gesamtleistung ist 2 Mill. mal so groß wie das, was wir heute brauchen; wenn man nur $\frac{1}{100000}$ davon an geeigneten Plätzen gewinne, so wäre das schon genug für das Zwanzigfache unseres heutigen Bedarfes.

Lohnend erscheint es daher zweifellos, dieser Frage näher zu treten. Auf einem sehr einfachen Wege sind sogar schon bescheidene praktische Versuche gemacht worden, indem man, ich glaube in Ägypten, flache Dampfkessel mit gut absorbierender Oberfläche von der Sonne heizen ließ und so eine Dampfmaschine in Betrieb setzte. Welche Erfolge damit erzielt wurden, ist mir nicht bekannt; daß man zu großen Leistungen auf diesem Wege wird gelangen können, ist nicht sehr wahrscheinlich.

Ob freilich ein anderer Weg, den ich noch kurz darlegen möchte, zu dem Ziele führen wird, ist heute auch noch völlig unbestimmt. Prinzipiell ist er möglich, ist er doch im Grunde nichts anderes als die Entstehung der Pflanze unter Absorption von Licht und ihre, oder ihrer Produkte, Verbrennung unter Gewinnung von Arbeit. Wir brauchten ja nur diesen Kreislauf schneller sich vollziehen zu lassen, brauchten nur ebenso geschwind die Pflanzen wachsen und verkohlen zu lassen, wie wir die Kohle nachher wieder verbrennen. Dann kämen wir mit der heutigen Sonnenstrahlung aus und hätten nicht nötig, auf die vergangenen Jahrtausende zurückzugreifen.

Nun, mit diesem Kreislauf, mit dem Pflanzenwachstum und der Ausnutzung seiner Produkte werden wir das schwerlich je erreichen. Diese intensive Forstwirtschaft geht weit über das hinaus, was selbst unterm günstigsten Klima möglich ist. Aber wir könnten vielleicht an Stelle dieses Kreislaufes irgendeinen anderen setzen, wir könnten irgendeine andere umkehrbare chemische Reaktion nehmen, die in der einen Richtung unter Absorption von Lichtenergie verläuft, in der anderen freiwillig sich abspielt und uns Arbeit zu leisten imstande ist. Solcher Umsetzungen kennen wir vorläufig eine bescheidene Anzahl; ein sehr anschauliches Beispiel ist der Zerfall des Wasserdampfes in seine Elemente Wasserstoff und Sauerstoff und ihre Wiedervereinigung zu Wasserdampf. Der Zerfall findet im Licht geeigneter Wellenlänge statt, natürlich unter Verbrauch einer gewissen Menge

strahlender Energie, und die beiden Spaltstücke können wir leicht wieder miteinander verbrennen, sei es unter dem Dampfkessel, sei es im Explosionsmotor, oder am besten, indem wir das Brennstoffelement der Zukunft damit betreiben, wie ich das vorhin ausgeführt habe. Die Umformung der Sonnenenergie in Arbeit wäre damit vollzogen.

Ja, wir kennen heute auch Erscheinungen, bei denen der photochemische Teil eines solchen Kreislaufes, der die strahlende Energie verbraucht, und der elektrische, der sie als elektrische Energie frei macht, bei denen beide an einer und derselben Stelle in einem und demselben Prozeß, einem photoelektrischen, sich abspielen. Wenn wir die Oberfläche gewisser Metalle, die sich in einem luftleeren Raum befinden, bestrahlen, oder wenn wir das gleiche tun etwa mit einem oberflächlich oxydierten Kupferblech, das in eine wässrige Lösung taucht, so tritt aus ihnen direkt Elektrizität aus, Elektrizität, die nach unseren heutigen Kenntnissen letzten Endes gar nicht anderes ist als ein Stoff, freilich von ganz besonderer Feinheit und mancherlei besonderen Eigenschaften, nicht der gleichen Ordnung, aber doch etwas ganz ähnliches wie unsere chemischen Elemente. Diese Elektrizität können wir durch eine der bestrahlten gegenübergestellte zweite Elektrode auffangen und der ersten durch einen Draht wieder zuführen. Dann erhalten wir einen elektrischen Strom, der uns Arbeit leisten kann: die denkbar direkteste und übersichtlichste Überführung von strahlender Energie in elektrische und damit in Arbeit.

Zwei einander nahestehende Wege haben wir also zur Gewinnung von Arbeit aus Licht: wir können irgend welchen chemischen Stoffen durch eine Umsetzung unter Lichtabsorption einen erhöhten Inhalt an chemischer Energie erteilen, den wir dann bei der freiwilligen Rückkehr zum Anfangszustand als Arbeit wiedergewinnen, oder wir können durch einen photoelektrischen Prozeß die Energie des absorbiert werdenden Lichtes direkt in elektrische umwandeln. Aber diese beiden Wege sind vorläufig noch weit, weit entfernt von irgendwelcher praktischen Verwendbarkeit. Die photoelektrischen Erscheinungen sind nur hochinteressante und bedeutungsvolle Objekte für die Forschung des Physikers — ich glaube nicht, daß bei allen Ausführungen dieser Versuche schon $\frac{1}{100}$ Pferdekraftstunde strahlende Energie die Umwandlung in elektrische durchlaufen hat — und bei den umkehrbaren photochemischen Prozessen liegt der Fall ganz ähnlich, nur daß an ihnen mehr der Chemiker sich abmüht. Ja, es muß bei beiden erst noch eine Schwierigkeit beseitigt werden, ehe man auch nur grundsätzlich von ihnen eine vorteilhafte Umwandlung der strahlenden Energie erwarten darf. Das Sonnenlicht ist bekanntlich aus sehr vielerlei Strahlen zusammengesetzt; die Zerlegung im Spektrum zeigt dem Auge Farben von Rot bis Violett, und Thermometer und photographische Platte lassen uns jenseits des sichtbaren Gebietes ultrarote und ultraviolette Strahlen erkennen. Jeder der erwähnten Vorgänge ist nun empfindlich nur für einen gewissen Strahlenbezirk, für eine gewisse Farbe. Nur der Anteil des Sonnenlichts, den diese ausmacht, wird von ihm absorbiert und kommt für die Umwandlung in Arbeit in Frage, und da diese Spektralbezirke im allgemeinen recht eng begrenzt sind, so geht bei jedem solchen Prozeß ein großer Teil der Strahlung verloren, er wird im reagierenden System oder, wenn er es unabsorbiert passiert hat, hinter ihm unter Umwandlung in Wärme nutzlos verbraucht.

Aber die wissenschaftliche Photochemie und gar das Studium der photoelektrischen Erscheinungen stecken noch so sehr in den Kinderschuhen, daß es ein sehr heikles Unternehmen wäre, von ihrem heutigen Stande aus eine etwaige künftige technische Entwicklung vorauszusagen oder abzuleugnen. Sicher ist es nicht, aber gewiß auch nicht unmöglich, daß wir einst auf einem dieser Wege unseren Gesamtbedarf an maschineller Arbeit der Sonnenstrahlung entnehmen, ja, daß wir dann vielleicht auch alle unsere Heizungen aus dieser Quelle betreiben, da ja die Umwandlung der mechanischen Arbeit in Wärme keinerlei Schwierigkeiten macht. Dann würden wir die in den Kohlelager noch gespeicherte Energie der vergangenen Jahrtausende nicht mehr verschwenden müssen, sondern sie nur noch dort gebrauchen, wo wir die Kohle eben nicht als Energiequelle,

sondern als Stoff benötigen, als Kohlenstoff, zur Reduktion der Metalloxyde bei der hüttenmännischen Gewinnung der Metalle und für einige sonstige chemische Reaktionen, unter denen dann vielleicht auch die Synthese der Nahrungsmittel einen Platz hat.

[A. 20.]

Die Versorgung der deutschen Gasanstalten mit Steinkohlen¹⁾.

Von Geheimrat Prof. Dr. A. FRANK, Charlottenburg.

Wenn auch die Deutsche Beleuchtungstechnische Gesellschaft sich in erster Reihe der Erörterung wissenschaftlicher und technischer Fragen widmet, so meine ich doch, daß die jetzige Zeit, welche die Betätigung aller Kräfte für das Gemeinwohl und die damit eng verknüpften wirtschaftlichen Fragen zur Pflicht macht, auch uns Anlaß geben muß, auf diesem Gebiete mitzuwirken.

Für die deutsche Gasindustrie, welche im Jahre 1913 3169 Millionen cbm Gas erzeugte und dafür bei einer durchschnittlichen Ausbeute von 300 cbm per ton rd. 10 563 000 tons Steinkohlen verbrauchte, ist die ausreichende und preiswerte Beschaffung dieses ihres Rohmaterials von uns größerer Bedeutung, als auch die bei der Herstellung des Gases gewonnenen Nebenprodukte Ammoniak und Teer bzw. die mit letzterem erhaltenen Fabrikate für unsere Landwirtschaft, wie für unsere Industrie von höchstem Werte sind. Aus all diesen Gründen ist eine Einschränkung des Betriebes untnlich, und es ist deshalb eine wichtige Aufgabe, die ausreichende Versorgung der Gaswerke mit Kohlen zu erschwinglichen Preisen zu sichern.

Da für den deutschen Steinkohlenbergbau im Betriebsjahr 1913 eine Gesamtförderung von 191 511 000 tons festgestellt ist, so repräsentiert der Bedarf der deutschen Gasanstalten nur einen Betrag von rd. $5\frac{1}{2}\%$ dieser Gesamtfördermenge. Dagegen sind im Betriebsjahr 1913 an deutschen Steinkohlen ausgeführt: 34,5 Mill. tons und an deutschem Koks 6,4 Mill. tons, entsprechend rd. 9 Mill. tons Steinkohlen und endlich an Steinkohlenbriketts 2,3 Mill. tons, so daß die gesamte Steinkohlengewinnung für die Ausfuhr sich auf rd. 45,8 Mill. tons beläßt, während die Einfuhr Deutschlands an hauptsächlich englischen Kohlen sich nur auf 10,5 Mill. tons stellte. Diese englische Kohle einfuhr dient zum großen Teil der Versorgung norddeutscher Gebiete, für welche sich infolge der billigen Seefrachten die Beschaffung englischer Kohle wesentlich billiger stellt, als der Bezug aus den oberschlesischen und westfälischen Bergwerksrevieren.

Ein hierfür nächstliegendes Beispiel liefern die Betriebe der städtischen Gaswerke hier in Charlottenburg und in der Landeshauptstadt Berlin.

Im Jahre 1913 gelangten in der Charlottenburger städtischen Gasanstalt 193 800 tons Steinkohle zur Vergasung; davon waren englische Kohle 164 250 tons und deutsche Kohle 29 550 tons, von welchen letzteren 23 850 tons aus Oberschlesien und 5210 tons aus Westfalen bezogen wurden. Die Preise der englischen Kohle stellten sich — 1913/1914 — loco Charlottenburger Gaswerk auf 16,46 M per Tonne, während sie für oberschlesische Kohle 18,38 M und für westfälische 22,59 M betragen.

Die städtischen Gaswerke in Berlin verwendeten für eine Produktion von 333 Mill. cbm Gas inkl. Wassergas 917 000 tons Steinkohle, von welchen 671 000 tons englische Kohle und 246 000 tons deutsche Kohle waren. Da anzunehmen ist, daß sich das Preisverhältnis für Berlin etwa ebenso gestaltet hat wie bei unserer hiesigen Gaswerksverwaltung, so kann den Gemeinden Berlin und Charlottenburg gewiß kein Vorwurf daraus gemacht werden, daß sie für ihre städtischen Gaswerke die wesentlich billiger zu beschaffende englische Kohle in größerem Maßstabe

¹⁾ Vortrag, gehalten in der Sitzung der „Deutschen Beleuchtungstechnischen Gesellschaft“ am 30. Januar 1915. In Anbetracht der wirtschaftlichen Bedeutung der vorliegenden Frage und zur Ergänzung der schon in dieser Zeitschrift (28, III, 103 [1915]) gebrachten Refrates erfolgt der Abdruck des Vortrags im Wortlaut. D. Red.