

Original-Mitteilungen an die Redaktion.

Die physikalischen Grundlagen der Kohlensäuretheorie der Klimaveränderungen.

Von Svante Arrhenius in Stockholm.

Aus einer Abhandlung von Herrn FRITZ FRECH¹, sowie aus einem Referat eines Aufsatzes von Herrn EM. KAYSER² ersehe ich, daß die Ansicht über die wärmeschützende Eigenschaft der Kohlensäure in dieser Zeitschrift in Zweifel gezogen worden ist, sowie daß ganz unrichtige Auffassungen über diese Ansicht in maßgebenden geologischen Kreisen vorkommen³. Da es wohl anzunehmen ist, daß eine richtige Darstellung dieser viel diskutierten Ansicht für die weitere Diskussion nützlich wäre, erlaube ich mir hier ein paar Worte über die physikalische Begründung dieser Ansicht mitzuteilen, indem ich den interessierten Leser für nähere Details auf die physikalischen Untersuchungen hinweise, welche diese Frage berühren.

Mein erster Versuch⁴, den Einfluß des Kohlensäuregehalts der Luft auf die Temperatur der Erdoberfläche zu berechnen, datiert von 1896 und wurde durch eine Diskussion in der Stockholmer physikalischen Gesellschaft über die möglichen Ursachen der Eiszeit veranlaßt. Ich benutzte dabei die kurz vorher erschienenen Messungen von LANGLEY⁵ über die Wärmestrahlung des Mondes als experimentelles Material. Ich kam dabei zu dem Schluß, daß eine Erniedrigung der Kohlensäuremenge auf die Hälfte des jetzigen Betrages die Temperatur der Erdoberfläche um etwa 5⁰ herabsetzen würde. Etwas mehr als die Hälfte dieser Temperaturerniedrigung kommt auf Rechnung der primären Wirkung der

¹ FRECH, N. Jahrb. f. Min. etc. Jahrg. 1908. II. p. 74.

² E. KAYSER, Dies. Centralbl. 1908. p. 553. Ref. von TH. ARLDT in Naturw. Rdsch. 24. 46. 1909.

³ KOKEN, Festband d. neuen Jahrb. f. Min. etc. 1907. p. 530.

⁴ S. ARRHENIUS, Phil. Mag. (5.) 41. 237. 1896. Bihang der Stockh. Akad. d. Wiss. 22. Abt 1. No. 1. 1896.

⁵ S. P. LANGLEY, The temperature of the moon. Memoirs of the National Academy of Sciences. 4. 9th memoir.

Kohlensäureabsorption, der Rest auf die zufolge der Abkühlung verminderte Wasserdampfmenge und damit zusammenhängende Wärmeabsorption der Atmosphäre. — Gegen eine ältere Angabe von DE MARCHI¹, daß eine Zufuhr von Wasserdampf zur Atmosphäre — z. B. durch Vulkaneruptionen — die Temperatur beeinflussen kann, muß bemerkt werden, daß eine solche Zufuhr nur darin resultieren kann, daß das Weltmeer (unmerklich) zunimmt, indem der Wasserdampf sich kondensiert. Dagegen bleibt ein Teil (etwa ein Sechstel) der der Atmosphäre zugeführten Kohlensäuremenge darin — die anderen fünf Sechstel werden ins Weltmeer aufgenommen —, wodurch eine Temperaturerhöhung zustande kommt. Diese verursacht eine Zunahme des Wasserdampfes in der Atmosphäre, wodurch die Temperaturerhöhung erheblich gesteigert wird.

Eine Zunahme der wärmeabsorbierenden Gase in der Luft übt eine ähnliche Wirkung aus, wie eine Zunahme der Wärmekapazität der Luft. Dadurch werden die Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht, zwischen Winter und Sommer, zwischen Kontinent und Meer, zwischen Pol und Äquator etwas ausgeglichen. Solche Zustände scheinen auf dem Planeten Mars zu bestehen, nachdem daselbst die Temperatur sehr viel (fast 50°) höher ist, als der Sonnenstrahlung entspricht und der Wärmegrad bei dem Pol, nach der bisweilen vorkommenden vollständigen Abschmelzung des Polareises zu urteilen, nicht sehr von der Temperatur am Äquator verschieden ist. Eine Abnahme der Kohlensäuremenge in der Luft wirkt in entgegengesetzter Richtung.

Einige Jahre danach erschien ein Aufsatz² von Hrn. ÅNGSTRÖM, in welchem er bestritt, daß die Wärmeabsorption der Kohlensäure so groß sein könnte, wie meine Berechnungen von LANGLEY'S Daten erwiesen. Dies war sehr unerwartet, da ÅNGSTRÖM in einer früheren Mitteilung³ die Absorption der Kohlensäure ganz außerordentlich überschätzt hatte — sie sollte 60 % der Sonnenstrahlung zurückhalten. Er faßte 1900 seine Ansichten in folgendem Schluß zusammen: „höchstens ca. 16 % von der Erdstrahlung können durch die atmosphärische Kohlensäure absorbiert werden und die Gesamtabsorption ist sehr wenig von den Veränderungen im atmosphärischen Kohlensäuregehalt abhängig, solange nämlich dieser nicht kleiner als 0,2 der jetzt vorhandenen ist.“

Um diese Verhältnisse näher zu untersuchen, führte ich⁴ im selben Jahr Versuche aus über die Strahlung eines Körpers von Zimmertemperatur gegen einen kalten Körper von — 80°, welche

¹ L. DE MARCHI, Le cause dell' era glaciale. Pavia 1895.

² ÅNGSTRÖM, Annalen der Physik. (4.) 3. 724. 1900.

³ ÅNGSTRÖM, Annalen der Physik. (3.) 39. 309. 1890.

⁴ ARRHENIUS, Annalen der Physik. (4.) 4. 690. 1901. Öfversigt der Stockh. Akad. d. Wiss. 1901. No. 1. p. 55.

Verhältnisse recht nahe den Verhältnissen entsprechen, welche bei der Strahlung der Erde gegen die höheren kalten Luftschichten und den Weltraum obwalten. Ich fand entgegen Herrn ÅNGSTRÖM's Ansicht, daß die Absorption der Kohlensäure gegen diese Strahlung stetig mit der absorbierenden Menge wächst, auch wenn die absorbierende Schicht dicker ist als der in der Luft vorhandenen Kohlensäuremenge entspricht und daß die absorbierte Menge über 30 % steigen kann. Diese Versuche gaben mit den aus LANGLEY's Daten berechneten Werten des Kohlensäureeinflusses recht gut übereinstimmende Resultate, und andererseits waren sie mit den Beobachtungen von TYNDALL¹ über die Absorption von geringen Kohlensäuremengen in bestem Einklang.

Dieser Schluß wurde jedoch durch zwei neuere Untersuchungen beanstandet. Die eine stammt von einem Schüler ÅNGSTRÖM's, Herrn KOCH², welcher fand, daß eine gegebene Menge Kohlensäure stärker absorbiert, wenn sie unter hohem, als wenn sie unter niederem Druck steht. Er zog daraus Schlüsse, welche die 1900 ausgesprochenen Ansichten seines Lehrers gegen meine Versuchsergebnisse stützen sollten. Die andere Untersuchung wurde von Herrn CL. SCHÄFER³ in RUBENS' Institut ausgeführt und stimmte in vielen Beziehungen nicht mit ÅNGSTRÖM's Auffassung überein, fiel jedoch in dem Punkte mit ÅNGSTRÖM's Meinung vollkommen zusammen, daß „Änderungen des atmosphärischen Kohlensäuregehalts überhaupt keinen Einfluß auf die Erdtemperatur haben, solange die Abnahme der Kohlensäure unter 80 % der bisherigen Menge bleibt“.

EKHOLM⁴ unterzog die Schlüsse von KOCH und ÅNGSTRÖM einer eingehenden Kritik, wodurch ihre Unhaltbarkeit erwiesen wurde. Diese Kritik wurde durch eine Experimentaluntersuchung von RUBENS und LADENBURG⁵ vollauf bestätigt, worin sie fanden, daß die Kohlensäure der Atmosphäre etwa 22,5 % der Erdstrahlung absorbiert und daß eine Zunahme der Kohlensäuremenge um 100 % die Absorption um etwa ein Zehntel ihres Betrages vergrößert. Dies stimmt keineswegs mit dem Schluß von ÅNGSTRÖM und SCHÄFER. Dies wird darauf zurückgeführt, daß ÅNGSTRÖM und KOCH Strahlungsquellen von recht hoher Temperatur (100—300° C) anwendeten und Steinsalzplatten in den Weg der Strahlung setzten, wodurch

¹ J. TYNDALL, Bakerian Lecture. 7. Febr. 1861. Neugedruckt in TYNDALL, „Contributions to molecular physics“. London 1872. p. 40.

² J. KOCH, Öfversigt der Stockh. Akad. d. Wiss. 1901. p. 475.

³ CL. SCHÄFER, Inauguraldissertation, p. 15. Annalen der Physik. (4.) 16. 93. 1905.

⁴ N. EKHOLM, Meteorologische Zeitschrift. 1902. p. 490—494.

⁵ H. RUBENS und E. LADENBURG, Verh. d. deutschen phys. Gesellsch. 1. 171—183. 1905.

ihre Messungen „nicht ohne weiteres auf die Erdstrahlung angewendet werden können“. Nebenbei ist zu erwähnen, daß die Hauptannahme, auf welcher KOCH seinen Schluß baut, nämlich, daß die Absorption der atmosphärischen Kohlensäure sehr niedrig sein müßte, weil der Partialdruck dieses Gases in der Luft sehr gering ist, durch neuere Untersuchungen von ÅNGSTRÖM¹ als unrichtig erwiesen worden ist. Von Herrn SCHÄFER's Schlußweise sagen RUBENS und LADENBURG, daß sie „nicht zulässig“ ist, weil seine Messungen über „kurzwellige Strahlung“ (Wellenlänge 2,6 μ bzw. 4,4 μ) nicht für die „langwellige“ Erdstrahlung (Wellenlänge des Strahlungsmaximums 10 μ) gültig sind.

RUBENS und LADENBURG haben also alle früheren Einwände gegen meine Berechnung weggeräumt. Sie wollten aber gegen eine Überschätzung des Einflusses der Kohlensäure warnen, indem sie äußerten: „Wenn also auch durch eine Änderung des Kohlensäuregehaltes der Atmosphäre um 20 % eine immerhin sehr merkliche Verringerung der Absorption der Erdstrahlung eintreten muß, nämlich um etwa $\frac{1}{30}$ dieses Betrages, so ist doch die hiermit in Zusammenhang stehende Abkühlung der Erdoberfläche keinesfalls allein ausreichend, um hieraus eine Erklärung für die Eiszeiten zu ermöglichen.“

Aus diesen Angaben will ich, um den Gang der Rechnung anzudeuten, eine approximative Berechnung der Einwirkung einer 20 %igen Abnahme der Kohlensäuremenge der Luft auf die Erdtemperatur durchführen — die Resultate einer genaueren Berechnung von RUBENS' und LADENBURG's Beobachtungsdaten sind unten angegeben. Die Kohlensäure absorbiert jetzt nach RUBENS und LADENBURG etwa 22,5 % der Erdstrahlung. $\frac{1}{30}$ davon ist 0,75 %. Nehmen wir erst an, die ganze absorbierte Wärmemenge bleibe der Erde erhalten, so steigt die Wärmestrahlung, die verloren geht, von 77,5 % auf 78,25 % der Erdstrahlung. Zufolge des STEFAN'schen Gesetzes, welches verlangt, daß die Strahlung der vierten Potenz der sogen. absoluten von -273° C gerechneten Temperatur proportional ist, müssen, falls die Einstrahlung von der Sonne und damit der totale Wärmeverlust der Erde nach außen unverändert bleibt, die Erdtemperaturen in den beiden Fällen durch folgende Gleichung verbunden sein:

$$77,5 T_0^4 = 78,5 T_1^4,$$

worin T_0 die jetzige mittlere Temperatur ($273 + 15^{\circ}$ C) und T_1 diejenige nach Verschwinden von 20 % der atmosphärischen Kohlensäure bedeuten. Hieraus findet man $T_1 = 287,067$, d. h. die Temperatur würde um $0,933^{\circ}$ C sinken.

Nun bleibt nicht die ganze, von der Kohlensäure absorbierte

¹ ÅNGSTRÖM, Arkiv f. Math., Astr. und Fysik der Stockh. Akad. 4. No. 30. 1908; vgl. EVA v. BAHR, Inauguraldiss. Upsala 1908.

Strahlung zurückgehalten, sondern ein Teil davon wird von den äußersten Kohlensäureschichten der Luft ausgestrahlt. Da diese viel kälter sind als die Erdoberfläche, so ist die verlorene Strahlung viel geringer als die zurückbehaltene; ich habe berechnet, daß von den 22,5 ‰, die absorbiert werden, 3,8 ‰ verloren gehen, also 18,7 ‰ wirklich zurückbehalten bleiben. Dadurch sinkt die oben berechnete Ziffer der Temperaturabnahme von 0,933° C auf $\frac{18,7}{22,5} \cdot 0,933 = 0,775^{\circ}$ C.

Infolge dieser Abkühlung wird Wasserdampf aus der Luft ausgefällt. Unter der wahrscheinlichen Annahme, daß die relative Feuchtigkeit unverändert bleibt, ist diese Wasserdampfmenge leicht zu schätzen. Nun übt der Wasserdampf eine viel kräftigere Absorption auf die Erdstrahlung aus als die Kohlensäure. Aus der Wärmeabsorption des Wasserdampfes und der Verteilung dieses Gases in verschiedenen Luftschichten — der Wasserdampf kommt hauptsächlich in den unteren Schichten der Atmosphäre vor, wogegen die Kohlensäure nach den bisherigen Messungen gleichförmig in der Luft verteilt ist — kann man in ähnlicher Weise, wie dies für die Kohlensäure ausgeführt worden ist, durch sukzessive Annäherungen die durch die Abnahme des Wasserdampfes sekundär entstehende Abkühlung berechnen. Ich habe auf diese Weise gefunden, daß diese sekundäre Abkühlung 86 ‰ von der oben berechneten primären Abkühlung beträgt, also in diesem Fall 0,667°, so daß die totale Abkühlung auf 1,442° C kommt.

Dies ist die Abkühlung zufolge einer Abnahme des Kohlensäuregehalts um 20 ‰. Man kann sich nun fragen, um wie viel muß die Kohlensäure in der Luft abnehmen, damit die Temperatur um 4,5° sinkt, der Temperatur während der Eiszeit entsprechend. Man kann diese Berechnung so ausführen, daß man die Temperaturabnahme wie oben berechnet, falls die Kohlensäuremenge um 50 und um 60 ‰ abnimmt, und dann zwischen diesen Werten interpolieren. Anstatt dessen kann man sich auch einer Regel bedienen, welche mit großer Annäherung auf diesem Gebiet gilt, nämlich daß, wenn die Kohlensäuremenge in geometrischer Progression abnimmt, so sinkt die Temperatur in arithmetischer. Nun ist $4,5 : 1,442 = 3,12$, folglich müßte die Kohlensäure im Verhältnis $(1 - 0,20)^{3,12} = 0,499$, d. h. rund um 50 ‰ abnehmen.

In ähnlicher Weise finden wir, daß damit das warme Klima der Eocänzeit, deren Temperatur um etwa 9° C höher als diejenige der Jetztzeit geschätzt wird, zurückkehrt, die Kohlensäuremenge der Luft auf viermal den jetzigen Wert steigen muß.

Obgleich diese Rechnung nur eine angenäherte ist, scheint mir doch die Abweichung von dem Resultat einer genauen Rechnung anzudeuten, daß RUBENS und LADENBURG vielleicht in der an-

geführten Äußerung die wärmeschützende Wirkung der Kohlensäure ein wenig übertrieben haben.

Abgesehen von dieser für die Beurteilung des Eiszeitproblems ganz irrelevanten Überschätzung des Kohlensäureeinflusses kann ich in der Hauptsache der genannten, auch von Herrn EMANUEL KAYSER angeführten Äußerung nur beistimmen. Sie erweckt aber den Anschein, als ob jemand behauptet hätte, daß eine Verminderung des Kohlensäuregehalts der Atmosphäre um 20 % die Temperatur der Eiszeit, die auf etwa $4-5^{\circ}$ unter der jetzigen geschätzt wird, verursachen könnte.

Daß ich so was nicht behauptet habe, war ohne Zweifel Herrn RUBENS wohlbekannt, da ich in meiner Abhandlung vom Jahr 1901, deren experimenteller Teil im Institut von Herrn RUBENS ausgeführt war, eine Abnahme des jetzigen Kohlensäuregehalts der Atmosphäre auf die Hälfte als für eine Temperatursenkung um $3,2^{\circ}$ nötig berechnet habe. Dabei ist die Wirkung der Abnahme des Wasserdampfes mit einberechnet. Eine Abnahme um etwa 58 % entspräche der Eiszeit ($-4,5^{\circ}$ C). Leider haben RUBENS und LADENBURG nicht angegeben, woher die von ihnen angeführte Schätzung stammt; mir ist sie völlig unbekannt.

Da die neuen Beobachtungen von RUBENS und LADENBURG eine Neuberechnung dieser Daten erwünscht machten, habe ich (1906) eine solche angeführt und kam zu dem Schluß, daß ein Sinken des jetzigen Kohlensäuregehalts um 54 % das Klima oder richtiger die Temperatur der Eiszeit herbeibringen würde. Die Unrechnung hat also fast dasselbe Resultat wie die ältere Berechnung gegeben.

Der geringe Unterschied der beiden Rechnungen beruht darauf, daß, sobald die Kohlensäuremenge in der Luft auf einen niedrigen Betrag sinkt, eine weitere Abnahme derselben um wenige Prozent einen sehr starken Einfluß ausübt. Aus RUBENS' und LADENBURG'S Messungen kann man leicht berechnen, daß das vollkommene Verschwinden der Kohlensäure aus der Luft eine Temperatursenkung von $14,6^{\circ}$ herbeiführen würde. Durch die sekundär bewirkte Ausscheidung des Wasserdampfes würde eine weitere Abnahme von etwa $12,5^{\circ}$ C erfolgen. Die gesamte Erniedrigung wäre demnach etwa 27° C. Das Schwinden der ersten Hälfte der Kohlensäure würde primär eine Senkung von $2,1^{\circ}$, sekundär eine von $1,8^{\circ}$, also von insgesamt $3,9^{\circ}$ herbeiführen, die zweite Hälfte also etwa 23° bewirken, d. h. etwa sechsmal so viel wie die erste Hälfte¹.

Ein Folge davon ist, daß, wenn auch die Angaben über die Kohlensäureabsorption und über die Temperatur der höheren Luftschichten recht bedeutend, wie beispielsweise innerhalb der bisher

¹ Vergl. ARRHENIUS, Medd. fr. Vetenskaps-akad. Nobelinstitut. 1. No. 2. p. 7. 1906.

von verschiedenen Forschern gefundenen Grenzen, geändert werden, die zur Herbeiführung einer Temperatursenkung von $4,5^{\circ}$, der letzten großen Eiszeit entsprechend, nötige Kohlensäureabnahme nur um etwa 10 %, zwischen 50 und 60 % des jetzigen Betrages, verändert wird. Vom geologischen Standpunkte bedeutet dieser Unterschied sehr wenig, denn ebenso leicht wie man eine Abnahme von 50 % zur Erklärung des Eiszeitklimas annimmt, ebenso einwandfrei läßt sich eine Abnahme von 60 % annehmen. Wie aus dem vorhin Gesagten erhellt, bringen die neueren Untersuchungen über die Absorption der Wärme durch Kohlensäure verschiedene neue Umstände von bedeutendem physikalischen Interesse ins Tageslicht, für die Frage nach der Erklärung des Eiszeitklimas mit Hilfe der Kohlensäurevariation sind aber diese neuen Entdeckungen ohne nennenswerten Einfluß, solange es feststeht, daß das vollständige Verschwinden der Kohlensäure aus der Luft eine Temperaturerniedrigung von zwischen 20 und 30° herbeiführen würde. In bezug auf diesen letzten Punkt sind, so viel ich kenne, alle Physiker, die auf diesem Gebiet gearbeitet haben, vollkommen einig.

Nach diesen Erörterungen, die vollständiger in meinen oben angeführten Publikationen ausgeführt sind, möchte ich ganz kurz einige Punkte besprechen, die ohne Berechtigung gegen meine Berechnungen angeführt worden sind.

Herr KOKEN sagt (l. c. p. 532): „Die Bedeutung des Wasserdampfes ist nicht gewürdigt.“ Daß diese Äußerung auf vollkommener Unbekanntschaft mit meinen Berechnungen beruht, dürfte ohne weiteres aus dem oben Gesagten ersichtlich sein.

Herr KOKEN äußert ferner (l. c. p. 533): „Der Effekt der Verbrennung von jährlich $600 \cdot 10^6$ t Steinkohlen auf das allgemeine Klima ist Null.“ Ich habe unter Annahme, daß jährlich $900 \cdot 10^6$ t Kohle verbrannt werden und daß ein Sechstel davon in der Luft verbleibt — der übrige Teil geht ins Weltmeer —, berechnet, daß die Kohlensäuremenge der Luft jährlich um 0,022 % des jetzigen Betrages zunimmt. Eine Änderung der Kohlensäuremenge der Luft um 1 % entspricht einer Temperaturänderung von nur $0,044^{\circ}$. Zufolge der Verbrennung von fossiler Kohle nimmt demnach die Temperatur jährlich um $0,001^{\circ}$ zu, ein Betrag, der nicht mit Sicherheit in weniger als etwa hundert Jahren zu konstatieren ist.

Weiter meint Herr KOKEN, daß die von den Vulkanen ausgesandte Kohlensäure ganz unzureichend ist, um merkliche Veränderungen des Kohlensäuregehalts der Luft mitzuführen (l. c. p. 533). Nach den Schätzungen von HÖGBOM ist in den Kalksteinen und Dolomiten wenigstens 25 000mal so viel Kohlensäure aufgespeichert als jetzt in der Luft. Eine ähnliche Schätzung von CHAMBERLIN gibt die entsprechenden Ziffern 20 000—30 000, also

genau denselben Wert, welcher als ein Minimum zu betrachten ist. Diese enorme Kohlensäuremenge ist nie gleichzeitig in der Luft vorhanden gewesen — die Atmosphäre dürfte vielleicht in den wärmsten Perioden etwa 10mal so viel, in den kältesten etwa 4mal so wenig Kohlensäure wie jetzt enthalten haben. Die ganze Menge von 25 000mal der jetzigen Menge muß also im Lauf der Zeit durch die Luft gewandert haben. CHAMBERLIN berechnete, daß die Verwitterung jährlich etwa den 10 000stel Teil der jetzigen Kohlensäuremenge der Luft verbraucht. Wenn die Verwitterung im selben Tempo nach der kambrischen Zeit fortgeschritten ist, so sind seit dieser Zeit wenigstens 250 Millionen Jahre verflossen. Diese Schätzung stimmt sehr gut mit anderen ähnlichen Berechnungen überein, welche für diese Zeit eine Dauer von 100 bis 1000 Millionen Jahren andeuten.

Diese Kohlensäuremenge muß also der Luft aus irgend einer Quelle herbeigeführt worden sein. Sie kann entweder vom Welt-raum gekommen sein, die Zufuhr von kohlehaltigen Meteoriten ist aber ganz verschwindend, indem die ganze Menge von herabfallenden Meteoriten pro Jahr nur 20 000 t beträgt, also etwa ein 30 000 000stel der Kohle in der Luftkohlensäure. Also muß die Kohlensäure aus dem Erdinneren zugeführt worden sein und die Geologen sind wohl darüber einig, daß diese Kohlensäuremengen den Vulkanen und den lange Zeit tätigen Mofetten entstammen. Auf alle Fälle kann man von einer solchen enormen Zufuhr nicht erwarten, daß sie stets gleichmäßig gewesen ist, welcher Ursache man sie auch zuschreiben mag. — Man könnte auch vielleicht an eine Änderung in der Verwitterungsgeschwindigkeit denken. — Die fundamentale Grundlage der von mir vertretenen Ansicht, wonach die Kohlensäuremenge der Luft sich im Laufe der Zeit geändert hat, ist also mit größter Wahrscheinlichkeit erfüllt.

Herr KOKEN spricht weiter (l. c. p. 534) die Ansicht aus, daß „nur die subaërischen Vulkane Kohlensäuregas liefern, das sich direkt und rasch in die Atmosphäre ziehen kann. Bei submarinen Eruptionen wird wahrscheinlich der größte Teil der Kohlensäure vom Wasser verschluckt“. Bei meinen Berechnungen habe ich immer angenommen, daß die geologischen Perioden so lange dauern, daß Gleichgewicht sich zwischen dem Kohlensäuregehalt der Luft und des Meeres herstellt. Die letzte Bemerkung von Herrn KOKEN ist daher nicht gegen diese Berechnungsweise aufrecht zu erhalten. Natürlicherweise findet nie vollkommenes, sondern nur angenähertes Gleichgewicht statt. — Tatsächlich scheint jetzt die Kohlensäuremenge im Meer etwas niedriger zu sein, als dem Gleichgewicht entspricht, indem der Kohlensäuregehalt über dem Meer im Mittel etwa 10⁰/₁₀ geringer ist als über der festen Erdoberfläche. Dies deutet in der Tat an, daß, geologisch ge-

sprochen, kurz vor der Jetztzeit der Kohlensäuregehalt der Luft niedriger als jetzt gewesen ist, was nach meiner Ansicht den Verhältnissen während der Eiszeit entsprach. — Wenn nun Herr KOKEN es wahrscheinlich machen könnte, daß die Kohlensäureausgüsse unter dem Meer mehr als fünfmal — das Teilungsverhältnis der Kohlensäure zwischen Meer und Luft ist nach SCHLOESING etwa wie 5 zu 1 — ergiebiger sind als diejenigen der subaërischen Vulkane, so würde seine Einwendung, obwohl wenig, doch etwas berechtigt sein. Ich glaube aber, daß eine solche Verteilung der Kohlensäureausgüsse sehr unwahrscheinlich ist, da die wasserbedeckte Erdoberfläche nur 2,76 mal größer als die luftbedeckte ist.

Eine ähnliche Berechnung läßt sich ebenfalls anführen gegen die von Herrn KOKEN (l. c. p. 535) geäußerte Ansicht über die Bedeutung der in fließendes oder Grundwasser aufgenommenen Anteile der bei der „Erstarrung der Tiefengesteine und der Intrusionen gebildeten Gase“.

Wie ein jeder sich leicht überzeugen kann, beruhen die von Herrn KOKEN geäußerten Bedenken gegen die Kohlensäuretheorie der Temperaturänderungen alle auf mangelnder Kenntnis der Grundlagen dieser Theorie. Vielmehr hat Herr PHILIPPI ganz recht, wenn er seine Kritik dieser Theorie in folgenden Worten zusammenfaßt¹: „Bis hieher (soweit es die physikalischen Voraussetzungen der Theorie betrifft) erscheint mir diese Hypothese unanfechtbar.“ Herr PHILIPPI hat demnach völlig eingesehen, daß die erwähnten Bedenken von Herrn KOKEN sehr schwach begründet sind.

Eine sehr sonderbare Kritik der physikalischen Arbeiten betreffs der Absorption von Wärme durch Kohlensäure hat Herr E. KAYSER² in Marburg geliefert. Ich würde nicht diese Publikation besprechen, wenn es nicht in einer sehr verbreiteten geologischen Zeitschrift³ mitgeteilt worden wäre, daß ich versprochen habe, mich darüber zu äußern. Als ich dies Versprechen Herrn FRECH gab, hatte ich nämlich nicht Gelegenheit gehabt, von Herrn E. KAYSER's Ausführungen Kenntnis zu nehmen.

Herr E. KAYSER teilt (l. c. p. 553) mit, daß er schon früher „unter Bezugnahme auf Arbeiten von ÅNGSTRÖM und CL. SCHÄFER jene (die Kohlensäure-) Theorie mit aller Bestimmtheit zurückgewiesen hat“. Man hätte wohl erwarten können, daß Herr E. KAYSER erwähnt hätte, daß die betreffenden Stellen in den Arbeiten von ÅNGSTRÖM durch die Untersuchungen von EKHOLM und mir, sowie RUBENS und LADENBURG, diejenigen in der Arbeit

¹ E. PHILIPPI, dies. Centralbl. 1908. p. 361.

² E. KAYSER, dies. Centralbl. 1908. p. 553.

³ F. FRECH, N. Jahrb. f. Min. etc. 1908. II. 82.

von CL. SCHÄFER durch die Kritik von seinem Lehrer RUBENS und LADENBURG als hinfällig erwiesen worden sind. Die Arbeit von RUBENS und LADENBURG hat Herr E. KAYSER angeführt, er scheint aber unglücklich genug gewesen zu sein, ihre Äußerungen betreffs der Abweichung ihrer Resultate von denjenigen der Herren ÅNGSTRÖM und CL. SCHÄFER zu übersehen (vergl. oben p. 483 u. 484).

Ebenso kategorisch äußert sich Herr E. KAYSER auf p. 555: „Wir wissen nämlich, daß vermehrte Dichte anders wirkt wie vermehrte Dicke.“ Diese Annahme, auf welcher Herr KOCH und nach ihm Herr ÅNGSTRÖM bei ihren Ableitungen 1900 und 1901 bauten, ist zufälligerweise von Herrn ÅNGSTRÖM¹ in seiner letzten Arbeit als unrichtig erwiesen.

Herr E. KAYSER führt auch die oben (p. 483) zitierte Stelle von RUBENS und LADENBURG an, wonach eine Änderung des Kohlensäuregehalts um 20% nicht eine Eiszeit hervorzubringen vermag, als gegen meine Rechnungen gerichtet an, was jedenfalls (vergl. oben p. 484) nicht zutrifft.

Herr E. KAYSER setzt die Krone seinem Werk mit der Behauptung auf, daß „diese Ergebnisse (die gegen die Kohlensäuretheorie angeführt worden sind) keinerlei Widerspruch erfahren haben“, woraus er schließt, daß „die CO²-Theorie von ARRHENIUS . . . physikalisch unhaltbar ist“. In einer Fußnote zu dieser Äußerung führt Herr E. KAYSER an, daß er durch die Sitzungsberichte des internationalen Geologenkongresses in Mexiko erfahren hat, daß Herr FRECH angegeben hat, „daß die Angriffe von ÅNGSTRÖM durch ARRHENIUS endgültig widerlegt sind“. Man hätte wohl erwartet, daß Herr E. KAYSER sich über diese Sache, eventuell durch Anfrage bei Herrn FRECH oder bei mir, unterrichtet hätte. Er würde dann ohne Zweifel auf die Abhandlungen von EKOLM (1902) und von mir (1901 und 1906) hingewiesen worden sein, welche zeigen, daß Herrn FRECH's Angabe wohl begründet war; dieselben sind auch in Aufsätzen von Herrn FRECH im Jahre 1906 und 1907 erwähnt worden², was Herrn EMANUEL KAYSER entgangen ist. Anstatt dessen zieht er vor, ohne weiteres zu erklären, daß „jeder Wissende dafür nur ein Lächeln übrig haben wird“.

Ohne Zweifel wird Herr EMANUEL KAYSER mit gleicher Bestimmtheit und ähnlichem Erfolg wie jetzt seine Kritik gegen die

¹ ÅNGSTRÖM, Arkiv f. Math., Astr. och Fysik der Stockh. Akad. 4. No. 30. 1908.

² F. FRECH, Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde, Berlin 1906, und die von Herrn KAYSER zitierten Sitzungsberichte des internationalen Geologenkongresses in Mexiko 1907.

Kohlensäuretheorie fortsetzen. Wenn ich nicht auf seine künftigen Mitteilungen in dieser Frage eingehe, so hoffe ich doch, daß jeder Physiker und vermutlich auch „jeder wissende“ Geologe ohne meine Hilfe mit Leichtigkeit die Bedeutung von Herrn EMANUEL KAYSER's physikalischen Betrachtungen einschätzen wird. Es scheint mir auch unzweifelhaft, daß er mit der von ihm gewählten Form seiner vorliegenden Kritik eine Gegenäußerung hat vermeiden wollen.

Asterolepis Rhenanus

(*Pterichthys Rhenanus* BEYRICH, TRAQUAIR, SMITH-WOODWARD).

Von **Guido Hoffmann** in Göttingen.

(Mit 3 Textfiguren.)

In seiner Monographie der *Asterolepiden* hat TRAQUAIR¹ *Asterolepis* und *Pterichthys* als zwei gesonderte Gattungen behandelt. Das für ihn wesentlichste Unterscheidungsmerkmal war das Überlagerungsverhältnis der vorderen mittleren Rückenplatte (*a. m. d.* = anterior median dorsal) zu den dorsalen Seitenplatten. Mit *Asterolepis* bezeichnet er diejenigen *Asterolepiden*, bei denen die Mittelplatte die vorderen und hinteren Seitenplatten (die *a. d. l.* = anterior dorso-lateral und *p. d. l.* = posterior dorso-lateral) überlagert, während bei den *Pterichthyern* nur die vorderen Seitenplatten von der *a. m. d.* überlagert werden, diese selbst aber von der *p. d. l.* überlagert wird*.

Nach dem zitierten Unterscheidungsmerkmale hat TRAQUAIR den von BEYRICH² beschriebenen und abgebildeten *Pter. Rhenanus* auch als *Pterichthys* aufgefaßt³ und SMITH-WOODWARD⁴ ist den Ausführungen TRAQUAIR's in seinem Katalog des Britischen Museums gefolgt. Hiergegen wandte sich 1903 O. JAEKEL⁵ in einer Publikation über: „Organisation und systematische Stellung der *Asterolepiden*“. Hier finden wir auch eine Zeichnung des *Asterolepis Rhenanus*, welche wegen der Angabe der Plattenüberlagerung kurz erwähnt werden muß. Ebendasselbst sind die Platten des *Pterichthys Milleri* abgebildet (den JAEKEL *Asterolepis Milleri* nennt), wogegen schon TRAQUAIR⁶ bestimmt und entscheidend sich ausgesprochen hat. Wenn ich von diesem Streit um einen Namen bzw. ein Gattungsmerkmal absehe, so muß ich doch darauf aufmerksam machen, daß die Benennung „*Asterolepis Rhenanus*“⁷ JAEKEL's nicht auf einer Erkenntnis der Überlagerungsverhältnisse der Platten bei *Pterichthys* (BEYRICH) begründet ist, sondern lediglich der grundsätzlichen Stellungnahme JAEKEL's entspricht, daß der Name *Asterolepis* auch für die *Pterichthyer* (TRAQUAIR's) beizubehalten sei.

* Auf die Gattungen *Bothriolepis* und *Microbrachius* einzugehen, ist hier nicht notwendig.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie](#)

Jahr/Year: 1909

Band/Volume: [1909](#)

Autor(en)/Author(s): Arrhenius Svante

Artikel/Article: [Die physikalischen Grundlagen der Kohlensäuretheorie der Klimaveränderungen. 481-491](#)