

551.510.41

551.515.8

Der Kohlendioxydgehalt der Luft als Indikator der meteorologischen Luftqualität

Von

KURT BUCH

1. Die gestellte Aufgabe.

Im Jahre 1921 wandte sich Prof. OSC. V. JOHANSSON an den Verf., derzeit am Institut für Meeresforschung mit Bestimmungen von Stickstoffverbindungen im Meerwasser beschäftigt, mit dem Vorschlage diese Untersuchungen auch auf Niederschlagswasser auszustrecken. Ausser als Beitrag zur Frage über die Stickstoffversorgung des Meeres wäre hiermit nämlich auch ein rein meteorologisches Interesse verbunden, indem die Schwankungen der Stickstoffgehalte in Zusammenhang mit der Herstammung der Luftschichten gestellt werden könnten, gemäss den Befunden u.a. von V. G. ANDERSON, der in Canterbury in Australien in Luftmassen verschiedener Herkunft deutliche entsprechende Variationen im Gehalte an Stickstoffverbindungen, besonders dem Nitritgehalte gefunden hatte. Die Analysenwerte konnten so als Indikatoren über die Herstammung ausgenutzt werden. Es wurden daraufhin im Institut Regenwasseranalysen über Ammoniak-, Nitrat- und Nitritgehalt in Gang gesetzt, die ein paar Monate fort dauerten. Ausserdem wurden von Herrn Apotheker F. W. FINNBERG regelmässige Analysen derselben Art in Storkyro während Juli 1921—April 1922 ausgeführt. Die im Institute ausgeführten Bestimmungen sind nicht veröffentlicht. Das meteorologische Resultat genannter Untersuchungen erwies sich als negativ. Es konnten aus den Analysezahlen keine sicheren Schlüsse über die Herkunft der Luft-

massen gezogen werden, aus welchen die Stickstoffverbindungen bei der Kondensation herausgelöst waren. Die Stickstoffanalysen in Niederschlagswasser wurden dann nicht weiter fortgesetzt und die Frage über chemische Indikatoren der Luftmassenherkunft blieb von Seiten des Verf. bis auf weiteres offen. Späterhin hat sich indessen Gelegenheit geboten zur Frage erneut zurückzukehren, diesmal mit einem anderen chemischen Merkmale, der Kohlensäure, im Zusammenhang mit Verf. Studien über den Kohlensäureaustausch zwischen Atmosphäre und Meer, welche mit Hilfe von kombinierten Bestimmungen der Kohlendioxydtenision des Meerwassers und des Kohlendioxydgehaltes in der Atmosphäre geschahen. Das vom Verf. gesammelte Material an Luftkohlendioxydbestimmungen ermöglichte nämlich eine Gruppeneinteilung der Gehaltsvariationen in deutlicher Beziehung zur Luftqualität. Es wurde hierauf schon kurz hingewiesen bei Gelegenheit der Veröffentlichung genannter Studien 1934 und 1939, aber damals auf die Frage nicht näher eingegangen. Zweck der vorliegenden Untersuchung ist nun dasselbe Material an Luftkohlendioxydanalysen einer erweiterten kritischen Prüfung zu unterziehen mit besonderem Hinblick auf die Frage in wieweit man aus dem CO_2 -Gehalt einer Luftprobe auf die Herkunft der Luftmasse schliessen kann.

2. Das Analysenmaterial.

Als Unterlage zur Untersuchung diente folgendes Analysenmaterial:

1) Im Sommer 1932 genommene Luftproben auf einer Fahrt zu den Heringsfang Gebieten nördlich von Island, an Bord des Fischereischiffes S/S Petsamo gehörend der Firma Elfving's Fiskeflotta Hangö, Finnland. Die Probenahme geschah zwischen Juni 24 und Sept. 9. Die meisten Proben wurden nördlich von Island, einzelne auf dem Fahrtwege Island-Skagen-Ostsee genommen. Die Proben wurden sofort nach Entnahme im Schiffslaboratorium analysiert. Die Bestimmung der Luftart und deren Herkunft geschah nach den Wetterkarten der Vaervarslingen på Vestlandet Bergen Norwegen, bei welchen Prof. Erik Palmén in liebenswürdiger Weise behilflich war.

2) Luftproben, genommen im Sommer 1935 auf dem Atlantischen Ozean längs der Strecke Skagen—Boston 6.—16. Juni und auf der Rückreise New York—Kopenhagen 7.—17. Sept. sowie einige an der Atlantküste im Ozeanographischen Institut Woods Hole Cape Cod Mass. U.S.A. und auf einer Terminfahrt an Bord des Forschungsschiffes desselben Institutes S/S Atlantis.

3) Proben 1936 auf einer Fahrt nach Spitzbergen längs der Strecke Narvik — $80^{\circ}45'$ N. $12^{\circ}53'$ E Aug. 14—24.

4) Regelmässige Probenahmen bei Liinahamari am Petsamofjord November 1933—Mai 1935 in c:a acht-tägigen Intervallen. Die Luftproben wurden in c:a 250 cm^3 fassenden Glaspipetten, versehen mit 2 Glashähnen, aufgenommen und per Post zum Institut für Meeresforschung zur Analyse eingesandt. Die Luftproben sind fast sämtlich doppelt, einige drei bis vierfach analysiert. Sämtliche hier erwähnte Analysen wurden mit dem Apparat von KROGH-REHBERG ausgeführt. Über Einzelheiten der Probenahme, Bewertung der Einzelanalysen u.s.w. sei auf die früheren Arbeiten verwiesen. Was die Bestimmungen der Herkunft der Luft der in Petsamo genommenen Proben betrifft, so erwies es sich, dass ein Teil derselben revisionsbedürftig waren, weil das ältere dem Verf. zu der Zeit zugängliche Material an synoptischen Karten nicht genügend zuverlässig war. Die Luftproben vom Atlantischen Ozean 1935 waren bisher keiner Luftmassenanalyse unterzogen. Verf. wandte sich an den Vorsteher des Wetterdienstes der Meteorologischen Zentralanstalt Helsingfors Dr. PHIL. M. A. FRANSILLA, der das Material des Verf. in dieser Hinsicht in freundlichst zuvorkommender Weise vervollständigte. Leider konnten vom Atlantischen Ozean zufolge des Mangels an synoptischen Karten keine Luftmassenanalysen vom westlichen Teil des Ozeans erhalten werden, sondern nur vom mittleren und östlichen Teil. Die Luftmassenanalysen zu den Proben bei Woods Hole und auf dem Atl. Ozean im Juli 1935 wurden freundlichst von Herrn R. B. MONTGOMERY bewerkstelligt.

Genanntes Analysenmaterial ist in folgenden Tabellen 1—4 zusammengestellt. Die Tabellen enthalten: Laufende Nummer, Angabe des Entnahmeortes und Entnahmezeitpunktes, CO_2 -Gehalt der Probe in $\text{cm}^3\text{ CO}_2$ pro 10 l Luft und die den synoptischen Karten entnommenen Angaben über die Herkunft und meteorologische Qualität der Luftmasse. Von den CO_2 -Analysen werden nur die Mittelwerte der Einzelanalysen angeführt. In den wenigen Fällen, wo nur einfache Analysen vorlagen, sind diese Analysen mit nur einer Dezimalenstelle angegeben. Ungenügend übereinstimmende Doppelanalysen wurden, wenn ein Analysefehler erkennbar war, verworfen, anderfalls ist der Mittelwert eingeklammert eingetragen. Bei sorgfältiger Arbeit sollten die Einzelanalysen weniger als 0.1 cm^3 je 10 l Luft auseinander liegen.

Über die einzelnen Tabellen seien noch folgende Angaben angeführt: *Tabelle 1*, Luftproben eingesammelt im Sommer 1932 auf dem Schelfgebiet

Tabelle 1. Probenahme im Sommer 1932 auf dem Schelfgebiete nördlich von Island und der Strecke Island—Ostsee. Vergl. Kartenskizze Abb. 1

N:o	Dat.	G.M.T.	Ortsangabe	CO ₂ cm ³ /10l	Nähere Merkmale der Luft
A. arktische Luft					
7	VII 8	16—17	Skaga Grund	3.11	Wahrscheinl. in Berührung mit Eis gewesen
14	VIII 9	16—17	Grimsey Flak	3.13	Rückseite d. Zyklone von Grönland her
15	» 10	16—17	» »	3.00	Dieselbe grönländische Luft
21	» 17	11—12	Huna Flóy	3.07	Typisch arkt. über Eisfeldern gelegen
22	» 18	12—13	» »	3.09	Dieselbe Luft mehr von Westen her
23	» 19	11—12	» »	3.09	» » » » » » » »
24	» 20	11—12	» »	3.11	» » » » » » » »
26	IX 2	—	Cap Langanes	3.12	Beginnender Einbruch v. arkt. Luft
27	» 7	—	N. Br. 57° 47', E 10° 31'	2.97	Kurz nach Einbruch arkt. Luft.
B. maritime Polarluft					
4	VII 1	15—16	N. Br. 62° 01' W 5° 30'	3.10	Einbruch marit. Polarluft
5	» 2	18—19	» 64° 50' » 10° 40'	3.17	Marit. Polarluft
12	VIII 6	11—12	Grimsey Flak	3.15	Marit. polar. Seit mehreren Tagen stürmische O—NO-Winde
18	» 14	11—12	Skaga Flak	(3.09)	
20	» 16	11—12	» »	3.17	Von W und NW her eingemischte Polarluft
25	» 30	17—18	Cap Langanes	3.15	Von S her kommende marit. Polarluft

C. kontinentale und tropische Luft					
1	VI 24	16—17	N. Br. 56°41', E. 5°5.5'	3-34	Warme kontin.(?) Hochdruckluft
2	» 29	17—18	» 55°56', W 6°21'	3-20	Warme marit. Luft von Süden her
3	» 30	17—18	» 59°07', » 6°14'	3-25	Regen, Nebel, Frontpassage. Von SW her marit. nicht rein tropische Luft
6	VII 6	15—16	Grimsey Flak	3-19	Vor kurzem aufgeklärt. Von SO u. S angekommen Luft
9	» 12	18—19	Skaga Grund	3-28	Von S her über England
10	» 14	11—12	Huna Flöy	3-24	Von S
11	» 17	11—12	» »	3-30	Maritime tropische Luft
13	VIII 8	16—17	Grimsey Flak	3-35	Einbruch warmer tropischer Luft, teilweise über das isländische Festland gezogen
19	» 15	11—12	Skaga Grund	3-21	Regen, Einbruch warmer Luft. Über Island gezogen
28	IX 9	11—12	N.Br. 55°54.5', E 15°53'	3-21	Innerhalb d. warmen Luftsektors an Mischluft grenzend
Mittelwert	d. arkt. Luft	.....	.....	3-08	3 Proben (lauf. Nr: 8, 16, 17) fortgelassen wegen Mangels sicherer Merkmale der Lufterstammung
»	d. marit. Polarluft	.....	.....	3-14	
»	d. kontin. u. tropischen Luft	.....	.....	3-26	
Maximum	d. arkt. Luft	.....	.....	3-13	
»	d. marit. Polarluft	.....	.....	3-17	
Minimum	d. » »	.....	.....	3-09	
»	d. kont. u. trop. Luft	.....	.....	3-19	

nördlich von Island nebst einigen auf der Strecke Island-Ostsee. Vergl. Kartenskizze Abb. 1. Die Analysen, da schon früher zu anderen Zwecken

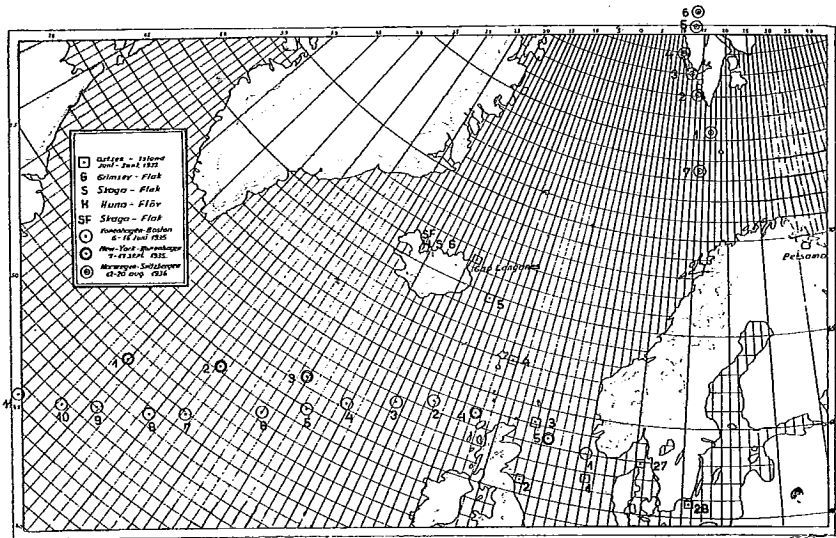


Abb. 1. Entnahmeorte der Luftkohlendioxidproben

interpretiert, sind nun fertig in drei Gruppen eingeteilt: 1 A, arktische Luft, 1 B, maritime Polarluft und 1 C kontinentale bzw. tropische Luft. *Tabelle 2*, Proben von Petsamo Ende Okt. 1933—Anfang Mai 1935. Auch diese sind nach erwähnter teilweiser Revision der Luftmassenanalysen in drei Gruppen eingeteilt: 2 A ausgeprägt arktische, 2 B ausgeprägt kontinentale oder kontinental-polare und 3 C maritime Luft vom nördlichen oder mittleren Atlantischen Ozean südlich von Island oder Grönland herkommend. In einer besonderen Gruppe 4 D sind noch eingetragen einige Proben, die gerade vor, während oder kurz nach einer Frontpassage entnommen wurden. Die Gruppeneinteilungen dieser zwei Tabellen decken sich nicht vollständig, naturgemäss zufolge der verschiedenen geographischen Lagen der Entnahmeorte. *Tabelle 3*, Proben vom Nordatlantischen Ozean, Sommer 1935. Eine Einteilung nach dem Schema der Tabellen 1 und 2 konnte zufolge der südlicheren Lage, hauptsächlich der grossen Entfernung von den arktischen Gebieten nicht beibehalten werden. Es wurde hier deshalb bis auf weiteres auf eine Gruppeneinteilung verzichtet um das Material später in einem gemeinsamen Schema einzuordnen. *Tabelle 4*, Luftproben von der Reise Norwegen-Spitzbergen Aug. 1936. Auch hier wurde bis auf weiteres auf eine Gruppeneinteilung verzichtet.

Tabelle 2. Petsamo, Liinahamari Okt. 1933—Mai 1935

N:o	Dat.	Stunde	CO ₂ cm ³ /10l	N:o	Dat.	Stunde	CO ₂ cm ³ /10l	Bemerkungen zu B u. D
A. Ausgeprägt arktische Luft				B. kontinentale Luft				
3	1934 I 25	15.15	3.15	1	1933 X 31	14	3.30	Kont.
4	II 1	11	3.02		1934			
6	III 1	12	2.87	5	II 10	12.30	3.30	»
11	IV 4	13.10	3.10	8	III 23	—	3.4	»
12	IV 21	16	3.15	9	» 29	15	3.38	Kont. warme Luft
13	IV 28	15.15	3.14	14	V 5	11	(3.31)	» » »
17	VI 2	10.20	3.17	22	VII 15	9	3.57	» » »
18	VI 10	10.10	3.19	23	VII 22	—	3.59	»
19	VI 16	11.10	3.04	25	VIII 26	8.30	3.25	» » »
20	VI 30	—	3.11	29	IX 23	9.15	3.35	» » »
21	VII 7	7.30	2.97	30	» 30	10.20	3.46	»
26	IX 1	8.45	3.06	31	X 7	10.25	3.55	»
33	X 21	—	2.93	32	X 14	9.55	3.30	»
34	X 27	—	2.83	39	XII 2	15.30	3.32	» polare Luft
35	XI 4	9.30	3.01	42	XII 30	—	3.18	»
36	XI 10	9.30	2.99		1935			
40	XII 9	19.15	3.11	44	II 10	11.20	3.24	»
	1935			45	II 17	10.40	3.28	» » »
43	I 27	19.10	(3.19)	46	» 24	12.45	3.48	»
51	IV 15	19.15	2.27	49	III 26	12.15	3.27	» » »
52	V 4	11.30	2.85					
C. Maritime Luft vom nördl. Atl. Ozean südl. v. Island u. Grönland				D. Probenahme unmittelbar vor, nach oder während der Frontpassage				
2	1934 I 18	12.30	3.40	7	1934 III 3	—	3.09	Arkt. Front sehr nahe
10	IV 2	—	3.40	27	IX 9	10.15	3.05	Kont. polar an arkt. Luft grenzend
15	V 12	11.55	3.19	38	XI 21	21	3.11	Maritim polar nicht typisch
16	V 19	—	3.21	39	XII 2	15.30	3.32	Arkt. Luft soeben verschwunden
24	VIII 19	—	(3.29)	41	XII 16	17.55	3.16	Gemischte kont. u. arkt. Luft
28	IX 16	9.15	3.22		1935			
37	XI 17	9.45	3.40	48	III 17	10.40	3.27	{ Arkt. Luft auf 100 km Entfernung vorhergehende Nacht verschwunden
47	1935 III 10	17.10	3.36	50	IV 7	9.40	3.15	Gemischte Luft, Frontpassage 10 Uhr
Mittelwert:								
A. arkt. Luft 3.04				Maxim. d. arkt. Luft .. 3.19				N:o 39 sowohl in Bals D aufgenommen
B. kont. » 3.31				Minim. d. kont. » .. 3.18				
C. marit. » 3.31				Minim. d. marit. » .. 3.19				

Tabelle 3. Nordatlantischer Ozean Dänemark—New York 1925, siehe Abb. 1.

A. 6—13 Juni						
N:o	Dat.	G.M.T.	Lat.	Long	CO ₂ cm ³ /10 l	Bemerkungen
1	VI 6	14	58°02'	E 4°52'	3.14	Marit. polar von Norden
2	» 8	10.15	58°30'	W 12°10'	3.3	» » westl. Herk.
3	» 8	20.30	57°35'	» 15°50'	3.32	» » » »
4	» 9	10	56°17'	» 20°10'	3.03	» » von N her- stamm.
5	» 9	20.30	54°55'	» 23°30'	3.1	» » » » »
6	» 10	10.30	53°27'	» 27°00'	3.1	» » » » »
7	» 11	11.30	50°57'	» 32°40'	3.16	In Veränderung begriffen von N. angelangte Luft
8	» 11	21.30	49°40'	» 35°20'	3.10	
9	» 12	11.30	48°00'	» 39°10'	3.23	Wahrscheinl. v. W Herk.
10	» 12	21.30	46°48'	» 41°40'	3.36	Wahrscheinl. kont. od. trop. Luft v. W über Florida
11	» 13	12	45°25'	» 44°50'	3.49	
Mittel d. Luftarten nördl. Herkunft (N:r 1, 4, 5, 6, 7, 8) 3.11						
Maxim. » » » » 1, 4, 5, 5, 7, 8) 3.16						
Mittel d. von W herstammenden Luftarten (N:r 2, 3, 9, 10, 11) 3.34						
Minim. d. » » » » 2, 3, 9, 10, 11) 3.23						
B. 11—16 Sept.						
1	IX 11	13.0	51°15'	W 40°06'	3.16	Marit. polar.
2	» 12	14.50	54°13'	» 32°40'	2.97	Herk. v. N arkt. Natur
3	» 13	15.50	56°32'	» 25°06'	2.97	» » » » »
4	» 15	12.40	58°43'	» 7°41'5	3.21	Rückkehr. (»return») marit. polar
5	» 16	9.50	58°18'	E 1°37'	3.10	Marit. polar mehr nördl. Herk. als vorhergehende

Sämtliche Proben marit. polar N:r 2, 3, 5 sicher von Norden.

Maximum 3.16 N:r 4 wahrscheinl. gemischt m. südl. Luft.

Tabelle 4. Luftproben zwischen d. Nordküste Norwegens und 80°45' N. Br. nördlich von Spitzbergen Aug. 1936, Vergl. Abb. 1.

N:o	Dat.	Stunde	Lat.	Long.	CO ₂ cm ³ /10 l	Bemerkungen
1	VIII 23	21	75°23'	E 17°05'	3.68	N:r 3, 4, 5 u. 6 arkt. Luft
2	» 23	9.35	77°03.5'	» 14°07'	3.18	N:r 1, 2 u. 7 nicht mehr
3	» 18	9.30	77°58'	» 13°00'	1.52	arkt. Ursprungs
4	» 19	20.30	78°52'	» 16°18'	1.93	Die Grenze d. arkt. Luft
5	» 20	8.45	79°56'	» 12°30'	2.57	wurde auf dem Rückwege
6	» 21	4.00	80°45'	» 12°53'	2.91	am 23. aug. am Morgen
7	» 24	9.00	73°24'	» 14°05'	3.65	passiert.

3. Ergebnisse.

Es seien nun zuerst die einzelnen Serien für sich besprochen. In Tab. 1, die meisten Proben vom Schelfgebiet N. von Island, stellen wir fest, dass die meteorologisch als arktische, Mittelwert 3.08, und maritime Polarluft, Mittelwert 3.14, bezeichneten Luftarten so wenig voneinander abweichen, dass man sie sachlos zu einer Gruppe vereinigen kann. Diese Luftarten können also hinsichtlich des CO₂-Gehaltes, nicht als verschiedener Qualität betrachtet werden. Der höchste CO₂-Wert der arktischen Proben 3.13 ist mit dem Mittelwert der maritimen Polarproben fast identisch, desgleichen der niedrigste der maritimen Polarproben mit dem Mittel der arktischen. Dagegen finden wir einen distinkten Unterschied zwischen diesen vereinigten (und besonders den ausgeprägt arktischen) und den als kontinentale und tropische Luft bezeichneten Proben, letztere mit dem Mittelwerte 3.25 und dem niedrigsten Gehalte 3.19. Dieser wird von keinem einzigen Wert der beiden anderen Luftarten nördlicher Abstammung überschritten. Wir stellen fest, dass eine Luftart in diesem Gebiet mit höherem CO₂-Gehalt als etwa 3.2 kontinentalen oder tropischen Ursprungs, mit niedrigerem Gehalt maritime Polar- oder arktische Luft ist.

Zu ähnlichem Resultat kommen wir mit den Petsamo-proben. Die Lage an der Grenze zwischen dem grossen Kontinent und der arktischen See bedingt eine etwas verschiedene meteorologische Charakterisierung. Der Unterschied zwischen arktischer Luft, Mittel 3.04, Maxim. 3.19,

und kontinentaler, Mittel 3.31, Minim. 3.18, ist noch ausgeprägter als bei Island. Die bzw. CO₂-Gehaltsamplituden berühren hier gerade einander. Die in der Gruppe C als maritim bezeichneten Luftarten stammen südlich von Island und Grönland her sind also nicht identisch mit denen in Tab. 1 als maritime Polarluft bezeichneten sondern schliessen sich den »tropischen« Luftarten an. In bezug auf den CO₂-Gehalt stimmen sie mit den kontinentalen überein und bilden eine gemeinsame Gruppe, die also mit der kontinentalen und tropischen Gruppe Islands zusammenfällt. Von besonderem Interesse ist die Gruppe D, in welcher unabhängig von der Luftmassenanalyse einige Proben zusammengeführt sind, deren Entnahme kurz vor, während, oder kurz nach einer Frontpassage geschah. Man könnte erwarten, dass die aneinander grenzenden Luftarten mehr oder weniger gemischt wären, welches sich in der CO₂-Analyse zu erkennen gäbe. Indessen liegen diese distinkt auseinander, was auf eine ziemlich scharf ausgeprägte Grenze zwischen den beiden Luftarten deutet. Nur zwei Proben Nr 41 und 50, die meteorologisch als gemischt bezeichnet sind, zeigen in Übereinstimmung hiermit Übergangswerte 3.16 bzw. 3.15 an.

Die nordatlantischen Proben zwischen Dänemark und U.S.A., Tab. 3, ergeben dasselbe Bild wie in Tab. 1 und 2. Da die Entnahmepunkte weit südlicher gelegen sind, können wir die Luftarten nicht in gleicher Weise wie oben charakterisieren, können aber trotzdem feststellen, dass auch hier die Luftarten nördlicher Herkunft durchwegs niedriger als die südlicher oder westlicher (kontinentaler) sind, ohne sich zu überschneiden, Höchstwert der maritim polaren 3.16, Minim.wert der kontinentalen oder tropischen 3.23. Eine einzige Probe mit dem Grenzwert 3.21 B Nr 4 als »Rückkehrende« maritime Polarluft bezeichnet, ist offenbar mit südlicher Luft gemischt. Was schliesslich die 7 Proben von der Spitzbergenreise 1935 betrifft, so weisen drei der nördlichsten Proben ganz extrem niedrige Werte bis herab zu 1.5 cm³/10 l auf. Ähnliche Befunde sind auch schon früher gemacht. So fanden MÜNTZ und LAINE in 10 Luftproben, welche von der Charcot-Expedition in den antarktischen Gewässern genommen wurden zwischen 1.45 und 2.55 variierende Werte mit dem Mittel 2.55. Solche extrem niedrige Werte sind also offenbar charakteristisch für hocharktische (bzw. antarktische) Luft zu betrachten. Die Entstehung dieser Verhältnisse wird im letzten Abschnitt besprochen.

Die drei hohen CO₂-Werte von der Spitzbergenreise repräsentieren kontinentale Luft. Die Probe mit dem niedrigsten Wert 3.18 wurde

auf der Rückreise gerade am Zeitpunkte der Passage durch die Front genommen, die beiden übrigen mit höheren Werten nachher.

Aus dem Betracht der Tabellen geht so hervor, dass die Luftart sich deutlich in den CO_2 -Gehalten zu erkennen giebt. Um den Überblick zu erleichtern wurde noch folgende Zusammenstellung, Tab. 5, gemacht, in welcher die verschiedenen Luftgruppen aus den Tab. 1—4 nach steigendem CO_2 -Gehalt geordnet sind. Die Tabelle enthält: 1) Entnahmegebiet, 2) meteorologisch bestimmte Herkunft der Luft, 3) die oberen und unteren CO_2 -Grenzen der bzw. Luftgruppen und 4) Mittelwerte nebst Angabe über die Anzahl Analysen, aus welchen letztere berechnet sind. Ferner benutzen wir die schon angewandte Einteilung: A. hocharktische

Tabelle 5. Vergleichende Zusammenstellung d. CO_2 -Gehalte der Luftarten von den verschiedenen Probenahmegebieten

Entnahmegebiet	Luftart	CO_2 -Gehalte	Anzahl Proben	Mittel
A. Hocharktische Luft				
Spitzbergen 78° — $80^\circ 45' \text{N}$	Niedergesunkene Luft	1.5 — 2.3	4	2.23
B. Luft arkt. Herkunft, teilweise umgewandelt				
Petsamo	Herkunft v. Norden	2.83—3.19	20	3.04
Schelfgeb. N v. Island	» » »	2.97—3.11	9	3.08
Skagen-New Foundl.	» » »	2.97—3.16	10	3.07
C. Maritime Luft, Herkunft v. nördl. od. mittl. Atl. Ozean				
Schelfgeb. N v. Island	Maritime Polarluft	3.09—3.17	6	3.14
Petsamo	S v. Island u. Grönl.	3.19—3.40	8	3.31
Skagen-New Foundl.	Marit. westl. Herk.	3.23—3.45	5	3.28
D. Kontinentale und tropische Luft				
Schelfgeb. N v. Island	kont. u. tropisch	3.19—3.35	10	3.26
Petsamo	kontinental	3.24—3.57	18	3.31
Norwegen-Spitzbergen	kontinental	3.65—3.68	2	3.66
Skagen-New Foundl.	Wahrsch. trop. Herk.	3.36—3.49	2	3.42

Luft, B. Luft arktischer Herstammung, teilweise umgewandelt, C. maritime Luft, Herkunft vom nördl. oder mittleren Atl. Ozean und D. kontinentale oder tropische Luft, und finden, dass die drei letzteren Gruppen in allen Entnahmegebieten repräsentiert sind bis hinauf zu 78° N. Br. Die hocharktische sowie entsprechende antarktische teilweise extrem CO_2 -arme Luft dringt wie es scheint überhaupt nicht in niedrigere Breiten ohne durch Zumischung umgewandelt zu werden. Offenbar besteht nun die Gruppe B gerade in dieser vom hohen Norden herkommenden Luft, die während ihrer Ausbreitung über die Polardecke Luft höheren CO_2 -Gehaltes aufgenommen hat. Wir kommen auf den Mechanismus noch zurück. Wir finden diese Luft im Petsamogebiet, bei Island aber auch so weit südlich wie auf der Strecke England-New Foundland. Der mittlere CO_2 -Gehalt dieser Luftart betrug 3.06, der beobachtete Höchstwert 3.19. Reihen wir zu dieser Gruppe ein auch die in Gruppe C bei Island zusammengeführten als maritime Polarluft bezeichneten 6 Proben mit dem Höchstwert 3.17, die offenbar auch nördlicher Herkunft sind, können wir also feststellen, dass sämtliche Luftproben nördlicher Herkunft niedrigeren CO_2 -Gehalt als etwa 3.2 besitzen. Betrachten wir dann die Gruppen C und D mit höheren Gehalten, nicht unter 3.19, so sind diese sämtliche kontinentaler oder maritimer Herkunft von Süden (tropische Luft). Hiermit wäre unsere eingangs gestellte Frage und Aufgabe, in wieweit der CO_2 -Gehalt als Indikator der Herkunft der Luftmasse gelten kann, beantwortet. Obgleich statistisch gesehen der Übergang von niedrigen zu höheren CO_2 -Gehalten ziemlich stetig ist, können wir doch eine gut ausgeprägte Grenze, die erwähnte 3.19 feststellen, welche die beiden Hauptgruppen der Luftmassen voneinander unterscheiden. Wird ein geringerer CO_2 -Gehalt als 3.19 cm^3 je 10 l Luft gefunden, so ist diese Luftart mit Sicherheit als arktischer Herkunft anzusprechen. Ist der CO_2 -Gehalt höher, so liegt ohne welchen Zweifel kontinentale oder maritime Luft südlicher Herkunft vor. Bei gemischter gerade während einer Frontpassage entnommener Luft kann naturgemäss ein näher am Grenzgehalt liegender CO_2 -Wert erwartet werden. Aber auch in diesen Fällen (Vergl. Tab. 2 D) wurden recht scharfe Übergänge gefunden. Wirkliche Mischluftproben gab es nur wenige.

Man könnte das Material hinsichtlich des CO_2 -Gehaltes auch nach einem anderen Prinzip eingeteilt denken, nämlich in maritime und konti-

mentale Luft, gemäss der schon alten Erfahrung, dass letztere höhere Gehalte aufzuweisen pflegt als erstere. Hiernach wäre alle arktische Luft als maritim zu bezeichnen. Die von Süden her kommende tropische Luft, die auch als maritim zu bezeichnen wäre, käme aber dann in die Gruppe der kontinentalen. Aus diesem Grunde erscheint die hier angewandte Einteilung in von Norden her und von Süden her kommende und Einordnung der kontinentalen zur letzteren rationeller. Allerdings stammt die arktische Luft gemäss dem Schema der Luftzirkulation auf dem Atlantischen Ozean nach BJERKNES ursprünglich auch von Süden, ist aber doch so stark umgewandelt, dass eine neue Benennung gerechtfertigt ist. Diese Umwandlung giebt sich, wie wir nun gesehen haben, auch in ihrem niedrigen CO_2 -Gehalt zu erkennen. Worauf dieser beruht hat Verf. schon in seinen früheren Arbeiten angedeutet jedoch nicht zusammenfassend behandelt, weshalb ein kurzer Überblick gerechtfertigt erscheint und zwar am besten unter Zuhilfenahme genannten Schemas

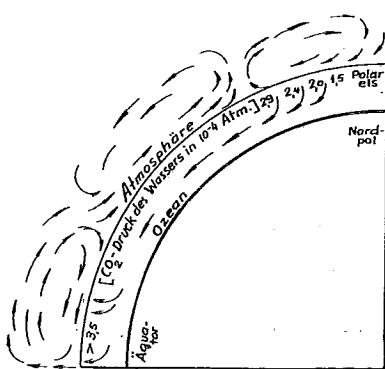


Abb. 2. Kreislauf des Kohlendioxyds im Anschluss an das Schema der Luftzirkulation über dem Atlantischen Ozean nach V. Bjerknæs.

von Bjerknæs Abb. 2. Die nach Norden (bzw. Süden) strömende Antipassatlufte ist reich an CO_2 , weil sie vor dem Aufstieg über den Equator in Berührung mit dem Ozean gewesen ist, welcher hier sehr hohe CO_2 -Tension 3.5 bis $5.10 \cdot 10^{-4}$ Atm. besitzt, dieses zufolge der von der Erdrotation bewirkten Vertikalbewegung aufwärts längs der Westküste Afrikas, mit Auftransport von CO_2 -reichem Tiefen-Wasser. Derjenige Anteil der Antipassatlufte, welcher bis über die Polardecke gelangt, besitzt immer noch ziemlich hohen Gehalt, verliert aber diesen in Berührung mit dem kalten Polarwasser, dessen CO_2 -Tension bei Null Grad etwa $1.5 \cdot 10^{-4}$ Atm. beträgt. Dass das

Wasser hier den ganzen Überschuss an CO_2 aufsaugen kann, sehen wir an den vier nördlichsten Spitzbergenproben Tabelle 4, und zwar ist diese Aufnahme am vollständigsten nicht sogleich an der Eisgrenze sondern erst südlicher, nachdem die Luft eine Zeitlang mit dem Wasser in Austausch gewesen ist; vergl. Abb. 3 mit den einge-

zeichneten CO_2 -Gehalten und den von E. PALMÉN angegebenen mutmasslichen Bewegungsrichtungen der Luft. Die hocharktische Luft breitet sich aber weiter nach Süden aus, wird erwärmt und bekommt so die für diese Luftart typische vertikale Instabilität, was zu kräftiger turbulenter Einmischung mit höheren Luftmassen von höherem CO_2 -Gehalt führt. So enthält die bei Petsamo, Island und auch auf der Strecke England—New Foundland entnommene als arktisch bezeichnete Luft höhere CO_2 -Gehalte als bei Spitzbergen. Trotzdem sind diese aber noch bedeutend geringer als die der tropischen herabgesunkenen oder seitlich eingemengten kontinentalen Luft. Jedoch büssen auch diese in Berührung

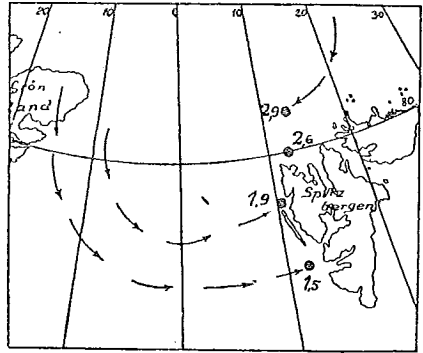


Abb. 3. Kohlendioxydgehale bei Spitzbergen nebst den von E. Palmén angegebenen mutmasslichen Bewegungsrichtungen der Luft

mit dem Wasser an CO_2 ein. Denn die CO_2 -Tension des Nordatlantischen Ozeans ist jedenfalls im Sommer niedriger als dem Gleichgewicht mit jeder Luft entspricht, von wo sie auch herkommen mag. So wurde im Juni 1935 auf der Strecke Skagen—Boston die mittlere CO_2 -Tension des Seewassers = 2.9 gefunden, die der Atmosphäre = 3.22. Der Nordatlantische Ozean ist also zu dieser Zeit konstant CO_2 absorbierend. Jede Luftart verliert an CO_2 . Dass die arktische aber weniger davon besitzt als die übrigen Luftarten ist lediglich darauf zurückzuführen, dass sie so viel längere Zeit mit dem Wasser in Berührung gewesen ist und zudem mit Polarwasser, dessen CO_2 -Tension noch viel niedriger als die des Nordatlantischen Wassers ist. Als besonders deutliches Beispiel der CO_2 -Abgabe ans Meer können die an der Atlantküste bei Woods Hole Mass. U.S.A. im Juli 1935 entnommenen Proben dienen. Es waren 7 Proben. Die erste am VII,2 entnommene war kontinental polar vom Hudson Bay und Labrador angekommene Luft, welche kürzere Strecken über See gezogen war mit dem CO_2 -Gehalt 3.19. Von den drei folgenden mit den niedrigen Gehalten 3.08, 3.05, 3.00 (Entnahme 5, 9 u. 11 Juli) war die erste auch kontinental polar, aber wenigstens 48 St. über Meer gezogen, die zweite maritim 4—5 Tage über Wasser und die dritte tropisch maritim von der Bermuda Gegend mehrere hundert Seemeilen längs

der Küste über dem Wasser gestrichen. Die sechste und siebente Probe mit 3.30 bzw. 3.42 (Entnahme VII. 26 bzw. 27) waren kontinental polar mit nur ganz kurzer Verweilszeit über Wasser. Auch mag an eine Serie auf Veranlassung von Herrn C. G. ROSSBY in verschiedenen Höhen über dem Meeresspiegel entnommene Proben erinnert werden, welche Anzeichen für die Entstehung eines Gradienten aufweisen. Die Proben wurden am 21. Juli an Bord des Forschungsschiffes S/S Atlantis des Ozeanographischen Institutes in Woods Hole bei 39°41' N, 69°50' W genommen.

Die Resultate waren folgende:

Höhe über dem Meeresspiegel:	0.3	1.5	4	8	30	Meter
CO ₂ -Gehalt	3.07	3.12	3.12	3.14	3.29	cm ³ /10 l

Die Luft war kontinental polar aber wesentlich modifiziert durch den Verweil von 36 Stunden über dem Meere. Die Gehalte stützen, auf CO₂ angewandt, die von Rossby für die Luftfeuchtigkeit aufgestellte Theorie, dass der Gehalt mit dem Logarithmus der Höhe über dem Wasser linear verläuft.

Noch wäre ein möglicher jahreszeitlicher Faktor zu erörtern. Die oben angeführten Resultate stützen sich hauptsächlich auf Probenahmen im Sommer, Juni bis Sept. Nur von Petsamo verfügen wir über das Jahr hindurch genommene Luftproben. Jahreszeitliche Variationen können von Seiten des Meeres bedingt werden, hauptsächlichst zufolge der Herbstkonvektion in den höheren Breiten, wodurch CO₂-reiches Tiefenwasser zur Oberfläche befördert wird, welche so eine hohe CO₂-Tension erhält, und den ganzen Winter über bestehen kann. Dieses wird durch Beobachtungen in den antarktischen Gewässern von G. E. R. DEACON bestätigt, der Tensionswerte von wenigstens $3.1 \cdot 10^{-4}$ Atm. fand, obgleich die Temperatur am Gefrierpunkte lag. Anzeichen zu einer beginnenden Konvektion finden wir auch so weit südlich wie auf der Strecke New York—Kopenhagen im Sept. 1935, wo die mittlere CO₂-Tension 3.00 betrug gegen 2.86 im Juni desselben Jahres. Indessen ist eine merkbare Steigerung des CO₂-Gehaltes der arktischen (bzw. antarktischen) Luft aus genanntem Grunde kaum zu erwarten, da schon die Sommermittelwerte (Tab. 5) diesem Werte sehr nahe liegen. Teilen wir die arktischen Petsamoproben in zwei halbjahrs-Gruppen ein, so finden wir als Mittel von 10 Winterhalbjahrs-Proben in der Zeit 15. Okt.—15. April sogar einen etwas niedrigeren Wert 3.02 als für die 8 Sommerproben = 3.10. Die ausgeprägte Differenz zwischen den hohen kontinentalen (inkl. süd-

lichen maritimen) Luft-CO₂-Gehalten und den niedrigen CO₂-Tensionen des Meeres bleibt das ganze Jahr hindurch bestehen, wengleich im Winter vielleicht mit etwas kleinerer Amplitude.

Zum Schluss sei noch an die bemerkenswerte Untersuchung von CALLENDAR erinnert, der gefunden hat, dass der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre seit Beginn des Jahrhunderts im Laufe von etwa 35 Jahren vom mittleren Gehalt 2.82 bis 3.22, also um 10 % zugenommen hat, zufolge der enorm gesteigerten industriellen Verbrennung. Hieraus folgte Verf.¹⁾, dass das Wasser des Nordatl. Ozeans um die Jahrhundertwende tatsächlich mit dem atmosphärischen Gehalte im Gleichgewicht gestanden hat, wenn wir nämlich die natürliche Annahme machen, dass die CO₂-Tension des Wassers unverändert geblieben ist und damals also dieselbe war wie jetzt, nämlich 2.8—2.9, ein neues Beispiel der menschlichen Kulturtätigkeit als geochemischer Faktor.

L I T T E R A T U R

- ANDERSSON, V. G., *Quartely Journal of the Royal Meteorological Society* B. 46. S. 99 (1915).
- BJERKNES, V.: On the dynamics of the circular vortex with applications to the atmosphere etc. *Geofysiske publ. utg. af den Geofysiske kommission, Kristiania* Vol II. N:o 4 S. 84—88 (1921).
- BUCH, K.: Beobachtungen über chemische Faktoren in der Nordsee, zwischen Nordsee und Island sowie auf dem Schelfgebiete nördlich von Island, *Conseil perm. intern. p. l'exploration de la mer. Rapp. et proc. verb.* Vol. LXXXIX. S. 13—31 (1934).
- » Beobachtungen über das Kohlensäuregleichgewicht und über den Kohlensäureaustausch zwischen Atmosphäre und Meer im Nordatlantischen Ozean, *Acta Academiae Aboensis Math. et phys.* XI. 9 (1939) Åbo, Finnland.
 - » Kohlensäure in Atmosphäre und Meer an der Grenze zum Artikum, *Acta Academiae Aboensis Math. et. Phys.* XI. 12. (1939) Åbo, Finnland.
 - » Den industriella förbränningen och atmosfärens kolsyrehalt. *Tekniska fören, i Finland förhandl., Årg.* 62. S. 41—45 (1942).
- CALLENDAR, G. S.: Variations of the amount of carbon dioxide in different air currents, *Quarterly Journ. of the Meteorol. Soc.* Vol. LXVI N:o 287. S. 395—400 (1940).
- DEACON, G. E. R.: Carbon dioxide in arctic and antarctic seas, »Discovery» Investigations, *Nature* B. 145. S. 250 (1940).

- FINNBERG, F. V.: Einige Bestimmungen des Gehaltes der atmosphärischen Niederschläge an Stickstoffverbindungen, etc. 1921—22, Societas Scient. Fennica Comm. phys. math. I. 28. (1923).
- KROGH, A.: und BRANDT-REHBERG, P.: CO¹-Bestimmungen in der atmosphärischen Luft durch Mikrotitration, Biochem. Zeitschr. B. 205. S. 265—72 (1929).
- MUNTZ and LAINE: Angaben entnommen aus LUNDEGÅRDH H.: Der Kreislauf der Kohlensäure in der Natur. Jena. p. 37—38 (1924).