

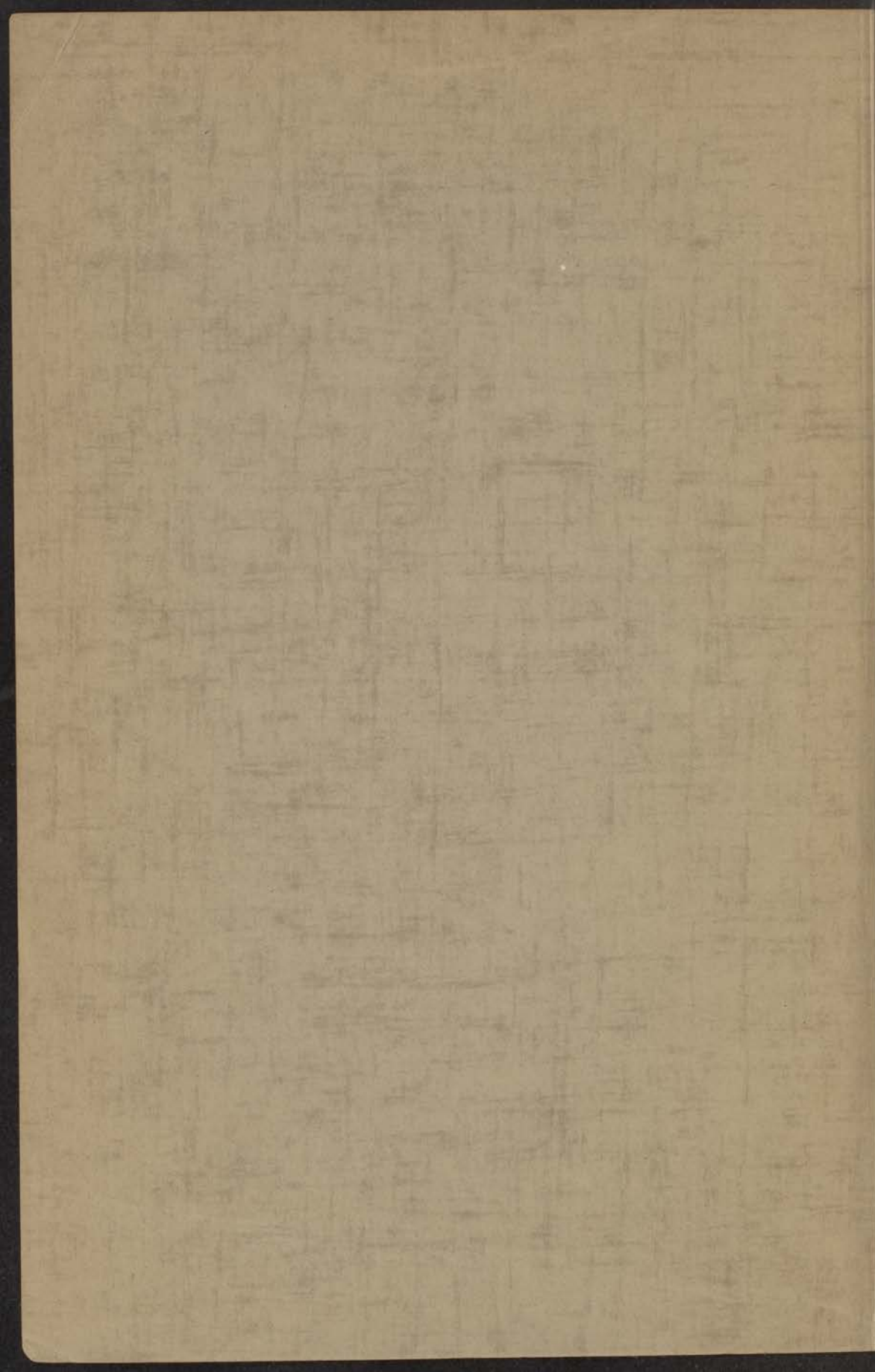
142

37

17

OVER STOFEXPLOSIES

G. J. O. ZONNENBERG



OVER STOFEXPLOSIES

OVER THE HILLS

3

OVER THE HILLS

OVER STOFEXPLOSIES

PROEFSCHRIFT TER VERKRIJGING VAN DEN
GRAAD VAN DOCTOR IN DE WIS- EN NATUUR-
KUNDE AAN DE RIJSUNIVERSITEIT TE LEIDEN,
OP GEZAG VAN DEN RECTOR MAGNIFICUS
Dr. J. VAN DER HOEVE, HOOGLEERAAR IN DE
FACULTEIT DER GENEESKUNDE, VOOR DE FA-
CULTEIT DER WIS- EN NATUURKUNDE PUBLIEK
TE VERDEDIGEN OP DINSDAG 23 FEBRUARI 1937,
DES NAMIDDAGS TE 4 UUR

DOOR

GERARD JAN OTTO ZONNENBERG

GEBOREN TE ROTTERDAM

DRUKKERIJ „LUCTOR ET EMERGO” — LEIDEN

OVER 270 EXPLOSIVES

The following is a list of the most common explosives used in the United States. This list is not intended to be a complete list of all explosives, but it covers the majority of those used in the United States. The list is arranged in alphabetical order of the name of the explosive.

1. Ammonium Nitrate
2. Dynamite
3. Nitroglycerin
4. Trinitrotoluene (TNT)
5. Picric Acid
6. Potassium Permanganate
7. Potassium Dichromate
8. Potassium Nitrate
9. Potassium Chlorate
10. Potassium Perchlorate
11. Potassium Nitrite
12. Potassium Nitrate
13. Potassium Chlorate
14. Potassium Perchlorate
15. Potassium Nitrite
16. Potassium Nitrate
17. Potassium Chlorate
18. Potassium Perchlorate
19. Potassium Nitrite
20. Potassium Nitrate
21. Potassium Chlorate
22. Potassium Perchlorate
23. Potassium Nitrite
24. Potassium Nitrate
25. Potassium Chlorate
26. Potassium Perchlorate
27. Potassium Nitrite
28. Potassium Nitrate
29. Potassium Chlorate
30. Potassium Perchlorate
31. Potassium Nitrite
32. Potassium Nitrate
33. Potassium Chlorate
34. Potassium Perchlorate
35. Potassium Nitrite
36. Potassium Nitrate
37. Potassium Chlorate
38. Potassium Perchlorate
39. Potassium Nitrite
40. Potassium Nitrate
41. Potassium Chlorate
42. Potassium Perchlorate
43. Potassium Nitrite
44. Potassium Nitrate
45. Potassium Chlorate
46. Potassium Perchlorate
47. Potassium Nitrite
48. Potassium Nitrate
49. Potassium Chlorate
50. Potassium Perchlorate
51. Potassium Nitrite
52. Potassium Nitrate
53. Potassium Chlorate
54. Potassium Perchlorate
55. Potassium Nitrite
56. Potassium Nitrate
57. Potassium Chlorate
58. Potassium Perchlorate
59. Potassium Nitrite
60. Potassium Nitrate
61. Potassium Chlorate
62. Potassium Perchlorate
63. Potassium Nitrite
64. Potassium Nitrate
65. Potassium Chlorate
66. Potassium Perchlorate
67. Potassium Nitrite
68. Potassium Nitrate
69. Potassium Chlorate
70. Potassium Perchlorate
71. Potassium Nitrite
72. Potassium Nitrate
73. Potassium Chlorate
74. Potassium Perchlorate
75. Potassium Nitrite
76. Potassium Nitrate
77. Potassium Chlorate
78. Potassium Perchlorate
79. Potassium Nitrite
80. Potassium Nitrate
81. Potassium Chlorate
82. Potassium Perchlorate
83. Potassium Nitrite
84. Potassium Nitrate
85. Potassium Chlorate
86. Potassium Perchlorate
87. Potassium Nitrite
88. Potassium Nitrate
89. Potassium Chlorate
90. Potassium Perchlorate
91. Potassium Nitrite
92. Potassium Nitrate
93. Potassium Chlorate
94. Potassium Perchlorate
95. Potassium Nitrite
96. Potassium Nitrate
97. Potassium Chlorate
98. Potassium Perchlorate
99. Potassium Nitrite
100. Potassium Nitrate
101. Potassium Chlorate
102. Potassium Perchlorate
103. Potassium Nitrite
104. Potassium Nitrate
105. Potassium Chlorate
106. Potassium Perchlorate
107. Potassium Nitrite
108. Potassium Nitrate
109. Potassium Chlorate
110. Potassium Perchlorate
111. Potassium Nitrite
112. Potassium Nitrate
113. Potassium Chlorate
114. Potassium Perchlorate
115. Potassium Nitrite
116. Potassium Nitrate
117. Potassium Chlorate
118. Potassium Perchlorate
119. Potassium Nitrite
120. Potassium Nitrate
121. Potassium Chlorate
122. Potassium Perchlorate
123. Potassium Nitrite
124. Potassium Nitrate
125. Potassium Chlorate
126. Potassium Perchlorate
127. Potassium Nitrite
128. Potassium Nitrate
129. Potassium Chlorate
130. Potassium Perchlorate
131. Potassium Nitrite
132. Potassium Nitrate
133. Potassium Chlorate
134. Potassium Perchlorate
135. Potassium Nitrite
136. Potassium Nitrate
137. Potassium Chlorate
138. Potassium Perchlorate
139. Potassium Nitrite
140. Potassium Nitrate
141. Potassium Chlorate
142. Potassium Perchlorate
143. Potassium Nitrite
144. Potassium Nitrate
145. Potassium Chlorate
146. Potassium Perchlorate
147. Potassium Nitrite
148. Potassium Nitrate
149. Potassium Chlorate
150. Potassium Perchlorate
151. Potassium Nitrite
152. Potassium Nitrate
153. Potassium Chlorate
154. Potassium Perchlorate
155. Potassium Nitrite
156. Potassium Nitrate
157. Potassium Chlorate
158. Potassium Perchlorate
159. Potassium Nitrite
160. Potassium Nitrate
161. Potassium Chlorate
162. Potassium Perchlorate
163. Potassium Nitrite
164. Potassium Nitrate
165. Potassium Chlorate
166. Potassium Perchlorate
167. Potassium Nitrite
168. Potassium Nitrate
169. Potassium Chlorate
170. Potassium Perchlorate
171. Potassium Nitrite
172. Potassium Nitrate
173. Potassium Chlorate
174. Potassium Perchlorate
175. Potassium Nitrite
176. Potassium Nitrate
177. Potassium Chlorate
178. Potassium Perchlorate
179. Potassium Nitrite
180. Potassium Nitrate
181. Potassium Chlorate
182. Potassium Perchlorate
183. Potassium Nitrite
184. Potassium Nitrate
185. Potassium Chlorate
186. Potassium Perchlorate
187. Potassium Nitrite
188. Potassium Nitrate
189. Potassium Chlorate
190. Potassium Perchlorate
191. Potassium Nitrite
192. Potassium Nitrate
193. Potassium Chlorate
194. Potassium Perchlorate
195. Potassium Nitrite
196. Potassium Nitrate
197. Potassium Chlorate
198. Potassium Perchlorate
199. Potassium Nitrite
200. Potassium Nitrate
201. Potassium Chlorate
202. Potassium Perchlorate
203. Potassium Nitrite
204. Potassium Nitrate
205. Potassium Chlorate
206. Potassium Perchlorate
207. Potassium Nitrite
208. Potassium Nitrate
209. Potassium Chlorate
210. Potassium Perchlorate
211. Potassium Nitrite
212. Potassium Nitrate
213. Potassium Chlorate
214. Potassium Perchlorate
215. Potassium Nitrite
216. Potassium Nitrate
217. Potassium Chlorate
218. Potassium Perchlorate
219. Potassium Nitrite
220. Potassium Nitrate
221. Potassium Chlorate
222. Potassium Perchlorate
223. Potassium Nitrite
224. Potassium Nitrate
225. Potassium Chlorate
226. Potassium Perchlorate
227. Potassium Nitrite
228. Potassium Nitrate
229. Potassium Chlorate
230. Potassium Perchlorate
231. Potassium Nitrite
232. Potassium Nitrate
233. Potassium Chlorate
234. Potassium Perchlorate
235. Potassium Nitrite
236. Potassium Nitrate
237. Potassium Chlorate
238. Potassium Perchlorate
239. Potassium Nitrite
240. Potassium Nitrate
241. Potassium Chlorate
242. Potassium Perchlorate
243. Potassium Nitrite
244. Potassium Nitrate
245. Potassium Chlorate
246. Potassium Perchlorate
247. Potassium Nitrite
248. Potassium Nitrate
249. Potassium Chlorate
250. Potassium Perchlorate
251. Potassium Nitrite
252. Potassium Nitrate
253. Potassium Chlorate
254. Potassium Perchlorate
255. Potassium Nitrite
256. Potassium Nitrate
257. Potassium Chlorate
258. Potassium Perchlorate
259. Potassium Nitrite
260. Potassium Nitrate
261. Potassium Chlorate
262. Potassium Perchlorate
263. Potassium Nitrite
264. Potassium Nitrate
265. Potassium Chlorate
266. Potassium Perchlorate
267. Potassium Nitrite
268. Potassium Nitrate
269. Potassium Chlorate
270. Potassium Perchlorate

Grand and City Commission

1910

Printed by the Grand and City Commission

Aan mijn Ouders.

Aan mijn Vrouw.

THE
MUSEUM

De voltooiing van dit proefschrift verschaft mij de gelegenheid allen, die tot mijn wetenschappelijke vorming hebben bijgedragen, mijn oprechten dank te betuigen.

Ik had het voorrecht deze dissertatie te bewerken onder leiding van Dr. W. P. Jorissen.

Prof. Dr. J. J. Blanksma was zoo vriendelijk mijn promotor te willen zijn.

De hulpmiddelen, bij mijn onderzoekingen gebruikt, werden voor een groot deel bekostigd uit subsidies, aan Dr. Jorissen verleend door bemiddeling van de Arbeidsinspectie en uit het Hoogewerff-fonds.

Die erste Aufgabe der Wissenschaft ist es, die
Wahrheit zu finden. Sie ist die Grundlage
aller anderen Wissenschaften.

Die zweite Aufgabe ist es, die Wahrheit
zu verstehen. Sie ist die Grundlage
aller anderen Wissenschaften.

Die dritte Aufgabe ist es, die Wahrheit
zu anwenden. Sie ist die Grundlage
aller anderen Wissenschaften.

INHOUD.

Inleiding	Blz. 3
---------------------	--------

HOOFDSTUK I.

A. <i>Kolloïdale systemen.</i>	6
B. <i>Aërosolen</i>	7
1. Definitie	7
2. Vorming	9
3. Eigenschappen	13
4. Stabiliteit.	21
5. Chemisch en physisch onderzoek	24

HOOFDSTUK II.

De factoren, welke van invloed zijn op het verloop van explosies in mengsels van brandbare stoffen en lucht.	29
A. <i>Factoren, welke zoowel bij gas- als bij stofexplosies een rol spelen.</i>	29
1. De mengverhouding van brandbare stof en lucht	29
2. De chemische samenstelling van de brandbare stof.	31
3. De intensiteit der ontsteking.	33
B. <i>Factoren, welke alleen (ook) bij stofexplosies een rol spelen.</i>	33
1. De grootte der deeltjes.	34
2. De cohaesie.	34
3. De verbrandingswarmte	45
4. De vorm	49

	Blz.
5. De hygroscopiciteit	50
6. Het aantal moleculen gas, dat bij verbranding gevormd wordt per molecuul brandbaar stof.	51
7. De adsorptie van zuurstof	60
8. Het asch- en watergehalte	66
9. Het verband tusschen de verschillende factoren	73

HOOFDSTUK III.

De oorzaken van stofexplosies; de ontsteking	75
1. Open vlammen.	75
2. Gloeiende voorwerpen	77
3. Vonken van verschillenden aard	81

HOOFDSTUK IV.

A. Onderzoek naar den invloed van een hoogere temperatuur op de explosiviteit van dextrine-luchtmengsels	92
B. Onderzoek naar den mogelijken invloed van verontreinigingen in het aardappelmeel.	97
C. Onderzoek naar de mate van oplading van niet geaarde metalen oppervlakken als gevolg van het langswrijven van dextrinestof en naar de ontstekingsenergie van methaan-lucht- en zwavel-luchtmengsels bij het gebruik van spitse electroden.	98
C. Verhinderung van de ontsteking van explosieve mengsels van lucht en brandbare stofsoorten, dextrinestof in het bijzonder	120
Gedachtengang bij het onderzoek; overzicht van de resultaten	122
Stellingen.	125

INLEIDING.

De onderzoekingen, die onder leiding van W. P. Jorissen in het Anorganisch-chemisch Laboratorium te Leiden op het gebied der explosieve reacties zijn verricht, hadden in de eerste plaats betrekking op reacties in mengsels van gassen of van gassen met dampen ¹⁾. Daarnaast kwamen al spoedig in behandeling reacties voortschrijdend in mengsels van vaste stoffen ²⁾, waarbij de analogie werd opgemerkt tusschen de vormen, waargenomen bij de explosiegebieden van gasvormige mengsels en die, welke voor den dag kwamen bij de reacties voortschrijdend in mengsels van vaste stoffen ³⁾.

¹⁾ Chem. Weekblad **15**, 709 (1918), **18**, 636 (1921), **19**, 193 (1922), **22**, 605 (1925), **25**, 44, 228 (1928); Rec. trav. chim. **39**, 715 (1920), **40**, 539 (1921), **44**, 1039 (1925), **54**, 888 (1935); Trans. Faraday Soc. **22**, 291 (1926); Ind. Eng. Chem. **19**, 430 (1927); Chimie et Industrie **20**, No. 5 (1928); Chem. Reviews **6**, 17 (1929); Coll. trav. chim. Tchecosl. **2**, 288 (1930); Natuurw. tijdschr. **13**, 189 (1931); met J. Velisek, Rec. trav. chim. **43**, 80 (1924); met J. C. Meuwissen, *ibid.* **43**, 594 (1924), **44**, 132 (1925); met J. H. A. P. Langen van der Valk, *ibid.* **44**, 810 (1925); met B. L. Ongkiehong, *ibid.* **44**, 814 (1925), **45**, 162, 224, 400, 633 (1926), **48**, 1069 (1929); met G. M. A. Kayser, *ibid.* **46**, 373 (1927); met J. Booy en J. van Heiningen, *ibid.* **49**, 876 (1930), **51**, 868 (1932); met J. J. Hermans, *ibid.* **52**, 271 (1933); met A. A. v. d. Dussen, *ibid.* **52**, 327 (1933); zie ook M. J. v. d. Wal, *ibid.* **53**, 97 (1934); J. Drop, *ibid.* **54**, 671 (1935); J. v. Heiningen, *ibid.* **55**, 65, 85 (1936). Zie verder de diss. van: J. H. A. P. Langen van der Valk, Leiden 1927; K. Posthumus, Leiden 1929; J. Booy, Leiden 1930; P. A. Jonquière, Leiden 1934; E. W. Lindeyer, Leiden 1935; A. la Fleur, Leiden 1935; J. Drop, Leiden 1936; A. M. v. Deventer, Leiden 1936.

²⁾ Met B. L. Ongkiehong, Rec. trav. chim. **45**, 540, 849 (1926); met C. Groeneveld, *ibid.* **46**, 47, 369 (1927), **47**, 737 (1928); met G. M. A. Kayser, Z. physik. Chem., Cohen-Festband, 1927, 482; Rec. trav. chim. **46**, 885 (1927); met M. A. Starink, Rec. trav. chim. **47**, 743 (1928); met A. H. Belinfante, *ibid.* **51**, 853 (1932); diss. J. H. van der Horst, Leiden, 1935.

³⁾ W. P. Jorissen, Verslag Congres te Praag 1928; Natuurw. Tijdschr. **31**, 189 (1931); Rec. trav. chim. **51**, 853 (1932).

Tenslotte kwamen ook in behandeling explosieve reacties in mengsels van gassen en fijn verdeelde vaste stoffen. Hier komen wij op het gebied der „stofexplosies”⁴⁾.

Ook bij deze systemen waren evenals bij de twee andere groepen, dikwijls stoffen aanwezig, die op de reactie vertragend of doovend werken. Bij de gasvormige mengsels werd b.v. de doovende werking onderzocht van niet brandbare gassen, dampen⁵⁾ of vaste stoffen⁶⁾; bij de mengsels van vaste stoffen (in poedervorm gemengd of gegelatineerd) waren het alleen onbrandbare vaste stoffen, welke op hun doovende eigenschappen onderzocht werden⁷⁾.

Bij de systemen van gassen en vaste stoffen in poedervorm kwam echter naast een doovend gas (b.v. de stikstof in de gebruikte lucht of opzettelijk toegevoegde doovende gassen of dampen) ook weder een doovend werkende vaste stof in behandeling⁸⁾.

Het aantal combinaties, dat voor onderzoek in aanmerking komt, is dus begrijpelijkerwijs groot; weinig systematisch onderzocht zijn nog mengsels van vaste stoffen en vloeistoffen.

Bij mijn onderzoekingen heb ik in het bijzonder de reacties in systemen van gassen en fijn verdeelde brandbare vaste stoffen (stofexplosies) aan een nader onderzoek onderworpen.

Aan de eene zijde heb ik mij beziggehouden met de *ontsteking* der mengsels, aan de andere zijde met de factoren welke op het *verloop* der reacties invloed uitoefenen.

4) W. P. Jorissen, Chem. Weekblad **29**, 273, 295, 758 (1932); Handelingen 24ste Nederl. Natuur- en Geneesk. Congres, 1933; A. A. v. d. Dussen, diss. Leiden 1933; W. P. Jorissen, A. A. v. d. Dussen, W. P. M. Matla en J. H. de Liefde, Rec. trav. chim. **52**, 403 (1933); G. J. O. Zonnenberg, Chem. Weekblad **31**, 722 (1934); A. A. v. d. Dussen, Rec. trav. chim. **54**, 873 (1935); W. P. M. Matla, diss. Leiden 1935, Rec. trav. chim. **55**, 173 (1936).

5) Zie een deel der literatuur, genoemd in noot 1.

6) A. A. v. d. Dussen, diss. Leiden 1933; A. J. Dijkman en Mej. C. A. C. Gerrits, Chem. Weekblad **31**, 718 (1934).

7) Zie een deel der literatuur, genoemd in noot 2.

8) A. A. v. d. Dussen, diss. Leiden 1933; Rec. trav. chim. **54**, 873 (1935); W. P. M. Matla, diss. Leiden 1935, Rec. trav. chim. **55**, 173 (1936).

Van de verschillende oorzaken van stofexplosies blijkt tegenwoordig de ontsteking door een ontlading van statische electriciteit de belangrijkste te zijn. In hoofdstuk IV wordt beschreven, hoe door wrijving van dextrinestof langs metalen oppervlakken, op deze laatste in korten tijd zeer hooge ladingen ontstaan, indien de aarding onvoldoende is; ontladingvonken kunnen gemakkelijk worden verkregen. In verband hiermede werd de ontstekingsenergie van methaan-lucht- en zwavel-luchtmengsels bepaald voor het geval, dat de ontlading plaats vindt tusschen spitse elektroden.

De verschillende factoren, welk op het verloop van een stofexplosie invloed uitoefenen en welke tot nu toe zonder eenig verband naast elkaar stonden, konden in een schema worden samengevat; een onderscheiding in primaire en secundaire factoren leidde tot een beter inzicht in de grootere of kleinere belangrijkheid van iederen factor afzonderlijk.

HOOFDSTUK I.

A. Kolloïdale systemen.

Het inzicht, dat we bij kolloïdale systemen niet met homogene, doch met heterogene meerphasige systemen te doen hebben, was een der algemeenste resultaten en tegelijk een der weinige van algemeen belang, waarover de onderzoekers het reeds vroeg eenigermate eens waren.

Tot de heterogene systemen behoort een groep, bij welke:

1^o. de beide fasen elkander onder groote oppervlakteontwikkeling aanraken en welke,

2^o. ruimtelijk meer of minder homogeen zijn, d.w.z. in ieder, zij het dan ook niet minimaal, volumedeel dezelfde ruimtelijke verdeling der fasen vertoonen.

Deze systemen zijn door Wo. Ostwald „*disperse heterogene systemen*” genoemd. Het zijn deze systemen, welke speciaal behandeld worden in de kolloïdchemie.

Niet het gedrag van de afzonderlijke phasedeeltjes, maar de som der eigenschappen van alle deeltjes samen (b.v. de groote oppervlakteontwikkeling der beide fasen in verhouding tot de door haar ingenomen ruimte), is voor de betrokken systemen karakteristiek.

De betrekkingen, welke op het aanrakingsvlak van twee fasen in het algemeen optreden (oppervlakte-energieën, elektrische energie), komen sterk naar voren.

In den regel is de eene phase in den vorm van afzonderlijke deeltjes, welke beweeglijk of niet beweeglijk kunnen zijn, in de andere phase verdeeld. Zulke systemen zijn b.v. suspensies, emulsies, schuimen, stof, nevel en rook.

De fijn verdeelde phase wordt meestal met den naam „disperse phase” aangeduid; de samenhangende phase kan „dispersiemiddel” genoemd worden.

Heterogene systemen kan men indeelen zoowel naar het aantal, als naar den agregaatstoestand der samenstellende phasen. In het gebied der disperse heterogene systemen zijn de tweephasensystemen verreweg het belangrijkste. Doordat elk der beide samenstellende phasen vast, vloeibaar en gasvormig kan zijn, hebben we bij de tweephasensystemen de volgende 9 mogelijkheden: vast + vast, vloeib. + vast, gasv. + vast, vast + vloeib., vloeib. + vloeib., gasv. + vloeib., vast + gasv., vloeib. + gasv., gasv. + gasv. Bij deze opsomming is het volgende op te merken.

Ten eerste bestaat voor de laatste theoretische mogelijkheid, dus voor een dispers heteroëen systeem met twee gasphasen, geen reëel voorbeeld.

Verder onderscheiden zich van de overige 8 mogelijkheden 6 daardoor, dat telkens 2 van hen uit phasen van denzelfden agregaatstoestand bestaan. De rechtvaardiging der bovenstaande onderscheiding ligt daarin, dat deze systemen, bij gelijke analytische samenstelling, een zeer verschillend karakter hebben al naar gelang een bepaalde phase als dispersiemiddel of als disperse phase optreedt. Uit het feit dus, dat elk der beide phasen zoowel dispersiemiddel als ook disperse phase kan zijn, volgt dat er 8 (respectievelijk 9) verschillende tweephasige disperse systemen zijn.

De andere systemen voorbijgaande, willen we ons nu in het bijzonder bezighouden met disperse heterogene systemen, waarbij het dispersiemiddel gasvormig is (de onder 7 en 8 genoemde systemen).

B. Aërosolen.

1. Definitie.

Van al de disperse systemen, welke men heeft bestudeerd, neemt er geen enkel in de natuur een belangrijkere plaats in dan dat, waarbij een vloeibare of vaste phase is gedispergeerd in een gasphase. Een groot deel van wat wij „weer” noemen

berust b.v. op de eigenschappen van gasvormige disperse systemen. Rook, nevel en *stof* spelen, als technische en economische factor in het productieproces, voor leven en gezondheid een groote rol; in den oorlog zijn zij een belangrijk wapen geworden en het luchtruim hebben zij voor reclaimedoeleinden veroverd.

Oorspronkelijk dispersoïden geheeten, werden zij later met den naam *aërosol* aangeduid, in analogie met de benaming van disperse systemen in water (hydrosolen). Onder den naam *aërosol* worden samengevat: wolken, nevel, mist, rook en *stof*.

De fasencombinatie vast-gas, in rook en in stofwolken en die van vloeistof met gas in de nevels, maakt vele eigenschappen eenvoudiger dan die, welke in een vloeibaar milieu worden aangetroffen.

De *aërosolen* zijn de disperse systemen, welker natuur reeds spoedig duidelijk is geworden. Hydrosolen heeft men wel als oplossingen beschouwd; rook en nevel kon men moeilijk tot de gas- of dampvormige mengsels rekenen.

De eerste wetenschappelijke waarnemers op dit gebied hebben reeds de continuïteit waargenomen, die van den gastoestand naar nevel of stofwolk leidt. Tyndall heeft het naar hem genoemde phenomeen voor het eerst aan *aërosolen* waargenomen; hij kon den „blauwen straal” verklaren, door de aanwezigheid aan te nemen van deeltjes weinig grooter dan moleculen; het verbleeken van den straal was dan het gevolg van de toename van de grootte der deeltjes.

Rook en nevel kan men tezamen met opgewerveld en verstoven vast en vloeibaar stof onder één gezichtspunt brengen; echter kan men ook het gebied van de deeltjes met een diameter tusschen 10^{-5} en 10^{-7} cm in het bijzonder beschouwen; aan disperse systemen met een dergelijke grootte der deeltjes zou men, in analogie met de hydrosolen, den naam *aërosol* kunnen toekennen.

Nu vallen echter de systemen, waarmee men in het algemeen te doen heeft, en waaraan ook in hoofdzaak de typische eigenschappen van disperse systemen in een gasmedium waargenomen en bestudeerd worden, meestal reeds niet meer in dit hoogdisperse gebied. Rookdeeltjes toch overschrijden al spoedig een grootte van 10^{-5} cm.

Het zou daarom een ongewenschte beperking zijn, wanneer men systemen met deeltjes van microscopische zichtbaarheid (10^{-5} tot 10^{-3} cm) van de aërosolen in engeren zin zou willen afzonderen. Den naam aërosol zullen we daarom in het vervolg toekennen aan gasvormige disperse systemen met vloeibare of vaste deeltjes, welke een grootte hebben liggende tusschen 10^{-7} en 10^{-3} cm.

2. Vorming.

Een aërosol kan gevormd worden volgens twee principieel verschillende methoden, nl.:

1^o. volgens de condensatiemethode (waarbij men een gas of damp doet condenseeren bij aanwezigheid van geschikte condensatiekernen ¹⁾) en

2^o. volgens de dispersiemethode (waarbij een vaste stof of vloeistof wordt gedispergeerd in een gas).

Ad 1^o. De condensatiemethode, vorming van nevel en rook. Condensatie vindt plaats, wanneer de moleculair-kinetische energie van het systeem tot een bepaalde waarde gedaald is. Deze waarde kan bereikt worden, zoowel door adiabatische expansie als door afkoeling. In beide gevallen vermindert de kinetische energie der afzonderlijke deeltjes, het gas wordt meer en meer oververzadigd en condensatie begint op te treden. De kiemen der nieuwe phase zijn, in verhouding tot het totaal getal aanwezige moleculen, gering in aantal. De verhouding van kiemvorming en kiemgroei bepaalt de structuur van het disperse product. Een voorbeeld van de vorming van een aërosol volgens de condensatiemethode zien we boven den schoorsteen van een locomotief. Het water condenseert daar op de aanwezige stofdeeltjes, rookdeeltjes of ionen en vormt een wolk. ¹⁾ Waterdamp condenseert het gemakkelijkst op negatief geladen kernen, terwijl de meeste andere dampen het gemakkelijkst verdicht worden op positief geladen kernen.

¹⁾ Aitken, Collected Scientific Papers, Cambridge, 1923; C. T. R. Wilson, Phil. Trans. A **189**, 265 (1897); A **192**, 403 (1899); Lenard, Sitzungsber. Akad. Heidelberg (1924), No. 29.

Als geen geschikte condensatiekernen aanwezig zijn, is een veel hogere graad van oververzadiging noodig alvorens een aërosol zich begint te vormen. W. E. Gibbs merkt op ²⁾, dat condensatie op kleine deeltjes alleen mogelijk is, als deze een straal hebben grooter dan 6×10^{-14} cm.

Het verloop der condensatie hangt bij nevels ook ten deele van het hygroscopische karakter der kernen af. Hoe sterker hygroscopisch de kernen zijn, des te sterker is de condensatie en des te stabielier is het gevormde aërosol. Dit zou een verklaring kunnen zijn van het feit, dat een mist boven een stad dikwijls veel langer blijft hangen dan boven het platteland; in het eerste geval kan nl. de lucht in sterke mate verontreinigd zijn met zeer kleine zwavelzuurdruppeltjes. Bij de aërosolvorming door condensatie kan de verscheidenheid der samenwerkende factoren zeer groot zijn; de invloed van elk hunner is dikwijls moeilijk afzonderlijk na te gaan. Bij nevels bestaat echter nog in zooverre uniformiteit, dat alle deeltjes kogelvormige druppeltjes zijn; bij rook en stofwolken speelt ook de invloed van vorm en structuur der deeltjes een rol. Hun bestudeering is daarom belangrijker, maar ook moeilijker. De stoffelijke individualiteit komt bij rook en bij stofwolken meer naar voren.

Omstandigheden, welke in den rooktoestand aanwezig waren, kan men dikwijls nog uit de gevormde producten afleiden; een nevel eindigt echter tenslotte altijd als vormlooze vloeistof-massa.

Verscheidene der onderzoekingen over den rooktoestand zijn verricht met metaal- en metaaloxhydrooken ³⁾, welke verkregen werden bij de verdamping van metalen, door een lichtboog tusschen twee metaalelectroden te doen ontstaan. Op deze wijze heeft men o.a. zilver-, cadmiumoxyde-, koperoxyde- en zinkoxyde-rooken vervaardigd.

²⁾ W. E. Gibbs, *Clouds and Smokes*, London, 1924.

³⁾ Hamburger, *Kolloid-Z.* **23**, 177 (1918); Kohlschütter und Ehlers, *Z. Elektrochem.* **18**, 373 (1912); Reinders en Hamburger, *Verslag Akad. Wetenschappen Amsterdam* **25**, 661 (1917); M. Knudsen, *Ann. Physik* (4) **50**, 472 (1916).

Whytlaw—Gray⁴⁾, werkende met rooken van cadmiumoxyde, koperoxyde en zinkoxyde, nam waar, dat de levensgeschiedenis van zulk een systeem kan worden verdeeld in 2 perioden⁵⁾:

a. Een periode van instabiliteit, met een hevige Brownsche beweging, welke vijf uur of langer duurt en waarin de daling van het aantal deeltjes met den tijd heel groot is. De deeltjes vallen samen en de gemiddelde doorsnee van een deeltje neemt toe (tot 10^{-5} à 10^{-4} cm).

b. Een periode van relatieve stabiliteit; de deeltjes zijn trager; het aantal is veel geringer en neemt heel langzaam verder af, in hoofdzaak als gevolg van bezinking. Deze periode kan 25 uur of langer duren, ook in een kleine ruimte.

Het verloop van deze veranderingen kan men aflezen uit de curven van fig. 1, waarin voor verschillende rooken de betrekking tusschen het aantal deeltjes per cm^3 en den leeftijd van den rook wordt weergegeven.

Een bijzondere soort van aërosolen van dit type zijn diegene, welke bij reacties ontstaan. Van deze zouden we kunnen noemen de zwavelaërosol (welke gevormd wordt bij de inwerking van zwavelwaterstof op zwaveldioxyde), de ammoniumchloride-aërosol (welke ontstaat bij de inwerking van ammoniak en chloorwaterstof op elkaar) en de phosphorpentoxyde-aërosol (welke ontstaat bij de verbranding van phosphor).

Ad 2^o. De dispersiemethode; vorming van stofwolken.

Aërosolen worden langs den weg der mechanische dispersie gevormd door het verstuiven van een vloeistof onder hoogen druk en door het malen van vaste stoffen. Wil men vaste stoffen met sproeiers dispergeeren, dan moet men ze in geschikte oplosmiddelen oplossen. Bij het malen tracht men met de meest geschikte mechanische middelen een zoo groot mogelijke verkleining te bereiken. Het malen zal het beste verloop hebben, als stoffen zoo heet en droog mogelijk verwerkt worden. De minder harde deelen van de te vermalen stof zullen het fijnste poeder leveren, de hardere deelen be-

⁴⁾ R. Whytlaw—Gray, Proc. Roy. Soc. A **102**, 600, 615 (1923).

⁵⁾ Ehrenhaft, Sitzungsber. Akad. Wiss. Mathemat. Kl. Wien **119**, 830 (1910).

vorderen de fijnmaling. Hoe meer de hardheid der verschillende deelen uiteenloopt, des te meer zal ook de hardheid der grovere en fijnere fracties van het ontstane poeder verschillen.

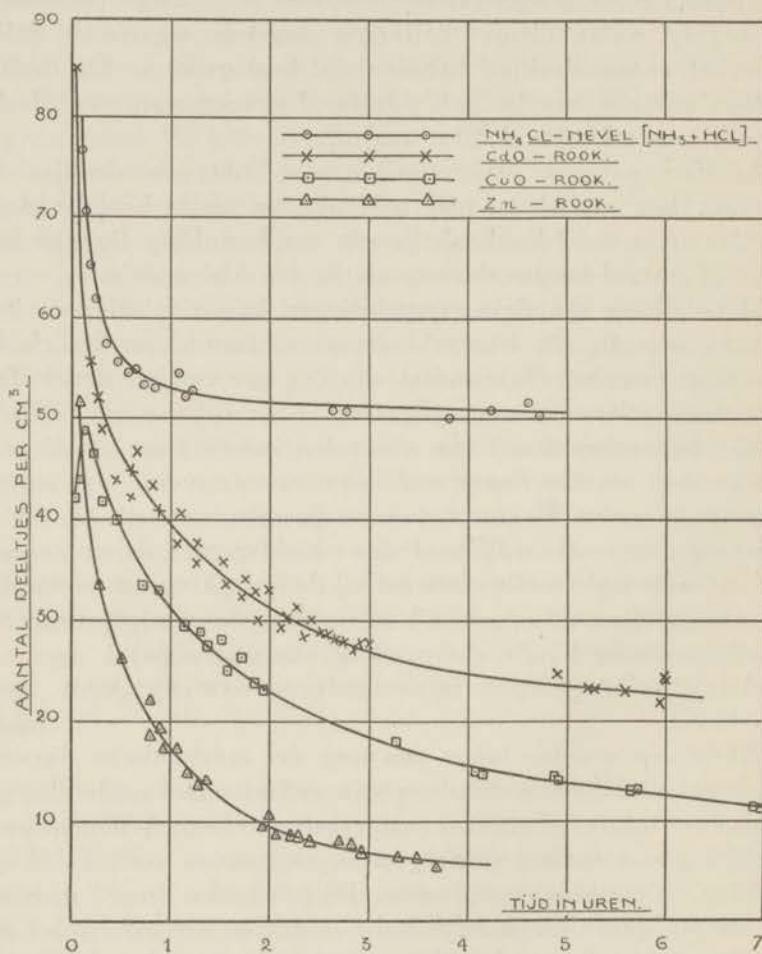


Fig. 1. Verandering van het aantal deeltjes eener rook met den tijd.

Whytlaw—Gray.

D. J. W. Kreulen⁶⁾ vond dit bevestigd bij het zeven van koolpoeders. Het zwevende stof zal tot het minst harde

⁶⁾ Chem. Weekblad **30**, 107 (1933).

deel der gemalen stof behooren. Bij het malen van korensoorten hebben we met een fijnwrijven der omgevende celwanden te doen. Het meel is eigenlijk reeds in verdeelden toestand in de graankorrel aanwezig.

De dispersiemethode wordt o.a. toegepast in meel-, aardappelmeel-, houtmeel-, cacao- en stijselfabrieken en in bierbrouwerijen (malen van mout). Ook cementmalerijen maken bij de fabricatie van de cement gebruik van de dispersiemethode. Wanneer het cement wordt gemalen, vormt zich een aërosol en deze wordt door pijpleidingen naar bezinkingskamers gezogen.

Mechanische dispersie wordt ook algemeen toegepast bij chemische oorlogvoering.

Voor stofwolken geldt hetzelfde als voor rooken, nl. dat naast andere factoren de vorm en grootte der deeltjes een belangrijken invloed hebben op het gedrag onder verschillende omstandigheden. Ook hier komt de stoffelijke individualiteit beter tot haar recht.

3. *Eigenschappen.*

De eigenschappen, welke specifiek zijn voor aërosolen en waarin ze zich dus van andere kolloïdale systemen onderscheiden, zijn het gevolg:

1^o. van de gaseigenschappen van het dispersiemiddel;

2^o. van de wijze, waarop de deeltjes een elektrische lading verkrijgen.

Ad 1^o. De structuur van aërosolen is eenvoudiger dan die van eenig ander type van kolloïden. Het is onmogelijk groote concentraties te krijgen, hetgeen te danken is aan het relatieve gemak van uitvloeking. De ijle bouw der gassen, hun geringe dichtheid, hun geringe inwendige wrijving en de groote weglengte hunner moleculen hebben tengevolge, dat in aërosolen de twee fasen zich gemakkelijk scheiden; dat de gedispergeerde deeltjes dus een groote neiging hebben om te bezinken.

Er zijn twee soorten van krachten, welke bijdragen in de beweging van de deeltjes in een aërosol. De eene soort komt geheel van buiten het systeem en omvat krachten zooals de zwaartekracht (α), en de photophorese (β), terwijl de andere

soort haar oorsprong in het systeem zelf vindt, zooals de Brownsche beweging (γ).

α . Wanneer een vloeibaar of vast deeltje is gesuspendeerd in een gas, is het onderworpen aan een algemeen bombardement van de moleculen van dit gas. Als het deeltje groot is in vergelijking met den gemiddelden vrijen weg van de gasmoleculen (10^{-5} cm), zal dit een voortdurenden gelijkmatigen druk onder vinden van het gas. Wanneer het deeltje zich nu b.v. tengevolge van de zwaartekracht beweegt door het gas, zal de kracht van de moleculaire botsingen aan de voorzijde van het deeltje grooter zijn dan aan de achterzijde, dit verschil zal toenemen met de snelheid van het deeltje. Het deeltje zal dus op zijn weg een steeds voortdurenden gelijkmatigen weerstand ontmoeten, welke grooter zal worden als de snelheid van het deeltje toeneemt.

Wanneer het deeltje echter klein is in vergelijking met den gemiddelden vrijen weg van de gasmoleculen (10^{-5} cm), zal het geen gelijkmatigen druk ondervinden. Het zal trachten tusschen de moleculen door te glijpen en zal heen en weer gedreven worden door de nu onregelmatig verdeelde botsingen van de gasmoleculen. Het deeltje zal ook om zijn as roteeren. Wanneer zulk een deeltje zich in een gas beweegt, b.v. onder den invloed van de zwaartekracht, zal het een zigzagweg afleggen.

Laten we nu den wrijvingsweerstand, welchen het deeltje in het gas ondervindt, K noemen. Stokes⁷⁾ heeft aangetoond, dat

$$K = 6 \pi \eta r v,$$

waarin η de viscositeit is van het gas, r de straal van het deeltje en v zijn snelheid. De weerstand neemt dus toe, als het deeltje grooter wordt of als het sneller beweegt. Hij is ook evenredig met de viscositeit.

Een deeltje wordt door de zwaartekracht verticaal omlaag getrokken met een kracht, welke in vacuo gelijk is aan

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g,$$

waarin ρ de dichtheid van het deeltje is. In een of ander gas

⁷⁾ Stokes, Mathematical and Physical Papers 3, 1 (1901).

of vloeistof, zal deze kracht verminderd worden met den weerstand van deze stoffen; zij zal dan gelijk zijn aan

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho') g$$

waarin ρ' de dichtheid van het gas of de vloeistof is. Wanneer de snelheid, waarmee het deeltje valt, zoo groot is geworden, dat de weerstand, welken het ondervindt, juist de aantrekking van de aarde opheft, zal het met deze snelheid blijven vallen.

Nu is:

$$6 \pi \eta r v = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho') g$$

zoodat v , de snelheid waarmee het deeltje eenparig valt, gelijk is aan:

$$v = \frac{2}{9} r^2 \frac{(\rho - \rho') g}{\eta}$$

(formule van Stokes).

Voor deeltjes van een bepaalde stof, vallende in de lucht, is dus de snelheid recht evenredig met het kwadraat van den straal. Nu zijn in een aërosol de viscositeit en de dichtheid van het dispersiemedium relatief klein, zoodat de gedispergeerde deeltjes geneigd zijn sneller te bezinken dan deeltjes van dezelfde grootte zouden doen in een meer visceus medium. B.v. is η water = $50 \times \eta$ lucht, terwijl ρ' water = $769 \times \rho'$ lucht. Het zijn deze sterk afwijkende viscositeits- en dichtheidsfactoren, welke aan de aërosolen hun bijzonder cachet verleen. Met deze formule heeft Stokes b.v. de snelheid berekend, waarmede waterdruppeltjes, waaruit wolken zijn opgebouwd, zinken in lucht. In dit geval is $\rho = 1$, ρ' is te verwaarloozen en η is 1.81×10^{-4} c.g.s.-eenheden, zoodat $v = 12 \times 10^5 \times r^2$ cm/sec. In tabel I zijn eenige op deze wijze berekende valsnel-

TABEL I.

straal der druppeltjes		valsnelheid
100 μ =	10^{-2} cm	4320 m/h
10 μ =	10^{-3} cm	43.2 m/h
1 μ =	10^{-4} cm	43.2 cm/h
0.1 μ =	10^{-5} cm	4.32 mm/h

heden van waterdruppeltjes van 10^{-2} tot 10^{-5} cm weergegeven. We zien uit deze tabel, dat van een opgewervelde stof-

wolk de deeltjes met een grootte kleiner dan $\pm 10 \mu$ zullen blijven zweven door de luchtstromingen, welke steeds aanwezig zijn; de grootere deeltjes bezinken snel.

Lord Rayleigh vond, dat de wet van Stokes niet meer doorgaat wanneer de straal der deeltjes 10^{-2} cm overschrijdt, daar de druppels onder deze omstandigheden als regen zouden vallen. De wet van Stokes geldt verder ook niet voor deeltjes, welke kleiner zijn dan den gemiddelden vrijen weg van de gasmoleculen. Een deeltje kleiner dan 10^{-5} cm, dus met een diameter kleiner dan deze gemiddelde weglengte, is geneigd tusschen de moleculen van het gas door te glippen. Cunningham⁸⁾ en Millikan⁹⁾ hebben uit waarnemingen van een van hen berekend, dat in zulk een geval de deeltjes voortgedreven worden door een kracht, grooter dan die, welke men zou verwachten overeenkomstig de wet van Stokes. Cunningham heeft daarom een correctieterm in de vergelijking ingevoerd. Indien de deeltjes kleiner zijn dan 10^{-5} cm, zal de snelheid

$$v = v' \left(1 + k \frac{\lambda}{r} \right)$$

zijn, waarin v de ware snelheid is, v' de snelheid volgens de wet van Stokes, k een constante (± 0.86) en λ de gemiddelde vrije weglengte der moleculen.

Tabel II¹⁰⁾ toont nu, hoe de waarden van v afwijken van degene, welke berekend zijn met de formule van Stokes. Uit deze tabel zien we, dat naarmate de druppel kleiner wordt,

TABEL II.

v uit de form. van Stokes	v uit de form. van Stokes—Cunn.
1×10^{-4} cm/sec.	1.14×10^{-4} cm/sec.
1×10^{-5} cm/sec.	2.57×10^{-5} cm/sec.
1×10^{-6} cm/sec.	4.5×10^{-6} cm/sec.
1×10^{-7} cm/sec.	1.70×10^{-7} cm/sec.

⁸⁾ Cunningham, Proc. Roy. Soc. **83** A, 357 (1910); Parankiewicz, Physik. Z. **19**, 280 (1918).

⁹⁾ Millikan, Physik. Z. **11**, 1097 (1910); Phys. Rev. **32**, 349 (1911); ook Trans. Am. Electrochem. Soc. **21**, 185 (1912).

¹⁰⁾ Cunningham, J. Am. Chem. Soc. **41**, 319 (1919); Phys. Rev. **1**, 218 (1913); **2**, 209 (1914).

de fout, welke men maakt, door v met de formule van Stokes te berekenen, grooter wordt. Met deze formule is het mogelijk de grootte van neveldeeltjes te bepalen, door waarneming van de verschuiving van een nevelgrens.

β . Het is Ehrenhaft ¹¹⁾ geweest, die aangetoond heeft, dat in een aërosol, welke deeltjes bevat met een grootte van de orde van 10^{-4} tot 10^{-6} cm en waarop sterk licht valt, zooals b.v. van een sterken lichtboog, de deeltjes door dit licht worden aangetrokken of afgestooten ¹²⁾. Of het verschijnsel van photo-phorese positief of negatief zal zijn, hangt af van het vermogen der deeltjes om stralingsenergie te absorbeeren ¹³⁾.

γ . De Brownsche beweging, welke kleine deeltjes in gasvormige media uitvoeren, is te danken aan de onregelmatigheid en toevalligheid der molecuulstooten. In 1881 heeft Bodazewski ¹⁴⁾ als eerste de Brownsche beweging in gassen waargenomen aan rook en neveldeeltjes, nadat zij in 1827 door Brown in een vloeistof-milieu was ontdekt.

Onafhankelijk van Bodazewski ontdekte Ehrenhaft ¹⁵⁾ in 1907 de Brownsche beweging in een gasvormig medium opnieuw en deed er de eerste grove metingen over.

Brownsche beweging treedt eerst op, wanneer de deeltjes der disperse phase een zekeren graad van kleinheid (kleiner dan 10^{-5} cm, dat is kleiner dan den gemiddelden vrijen weg der moleculen) hebben. Bij wolken b.v. zijn de deeltjes zoo groot, dat geen Brownsche beweging is waar te nemen; bij rook en stofwolken met heel kleine deeltjes vindt de Brownsche beweging wel plaats.

Wanneer men een deeltje, dat in Brownsche beweging is, met geregelde tusschenpoozen waarneemt en de plaats noteert,

¹¹⁾ Ehrenhaft, *Physik. Z.* **18**, 359 (1917).

¹²⁾ Wells and Gerke, *J. Am. Chem. Soc.* **41**, 324 (1919).

¹³⁾ Rubinowics, *Ann. Physik* (4) **62**, 691, 716 (1920); Laski and Zetner, *Z. Physik* **3**, 224 (1920); Ray, *Ann. Physik* (4) **66**, 71 (1921); Clerk Maxwell, *Electricity and Magnetism* (Oxford 1873); Nichols and Hull, *Astrophys. J.* **17**, 352 (1903).

¹⁴⁾ Bodaszewski, *Beibl.* **8**, 488 (1883).

¹⁵⁾ Ehrenhaft, *Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien*, **116**, 1139 (1907); *Physik. Z.* **16**, 227 (1915).

kan men al de afgelegde stukjes weg projecteeren op een rechte lijn. De algebraïsche som van de projecties, gesommeerd van een tijd o tot een tijd t stellen we voor door Δ . Het gemiddelde van Δ , genomen voor een groot aantal deeltjes, zal nul zijn. Dit is niet het geval met het gemiddelde van Δ^2 , genomen voor een groot aantal deeltjes. De wortel uit dit gemiddelde kwadraat ($\overline{\Delta^2}$) noemt men de amplitude der Brownsche beweging. Dus

$$A = \sqrt{\overline{\Delta^2}}$$

De amplitude der Brownsche beweging in een aërosol (welke deeltjes bevat klein genoeg om dit verschijnsel te vertoonen) overtreft die in een hydrosol, hetgeen te danken is aan het feit, dat de moleculen in een aërosol zoo ver uiteen liggen en dus een relatief langen gemiddelden vrijen weg hebben. Men heeft gevonden, dat bij gewone temperatuur en druk de verplaatsing van een deeltje, gesuspendeerd in lucht, $8 \times$ zoo groot is als de verplaatsing van een deeltje, gesuspendeerd in water. Deze verplaatsing neemt uit den aard der zaak toe met afnemenden druk ¹⁶⁾.

Berekeningen van von Smoluchowski ¹⁷⁾ en Einstein ¹⁸⁾ over de amplitude der Brownsche beweging, beide langs geheel anderen weg, hebben tot eenzelfde formule geleid, de zgn. formule van Einstein voor de amplitude der Brownsche beweging:

$$A = \sqrt{\frac{RT}{N} \cdot \frac{t}{3\pi\eta r}}$$

waarin t = den tijd en η = de viscositeit van het gas voorstellen.

Hun berekeningen zijn bevestigd door proeven van Ehrenhaft ¹⁹⁾, die werkte met cigarettenrook en met ammonium-

¹⁶⁾ Millikan, *The Elektron*, 1914. Univ. of Chicago Press.

¹⁷⁾ Von Smoluchowski, *Bull. Intern. Acad. Sci. Cracovie* **7**, 577 (1906); *Ann. Physik* (4) **21**, 756 (1906).

¹⁸⁾ Einstein, *Ann. Physik (Drude)* **17**, 549 (1905); **19**, 280 (1906); *Z. Elektrochem.* **14**, 235 (1908); von Smoluchowski, *Ann. Physik (Drude)* **21**, 756 (1906).

¹⁹⁾ Ehrenhaft, *Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien*, **116**, 1139 (1907); *Physik. Z.* **16**, 227 (1915).

chloridenevel; en door de Broglie²⁰), die met metaaloxyd-rook experimenteerde.

Millikan²¹) toonde eveneens door een grondig uitgewerkt experiment aan, dat de formule van Einstein juist is. Ook met deze formule is het mogelijk de grootte van deeltjes te bepalen, door waarneming van de verschuiving van een nevel- of rookgrens.

Ad 2^o (over de electriche lading der deeltjes). Door het ontbreken van een electriche dubbellaag verkeerden aërosoldeeltjes, met betrekking tot hun lading, in geheel andere omstandigheden dan hydrosoldeeltjes. Het groote aantal ionen, hetwelk in hydrosolen (en ook in andere kolloïdale systemen met geleidende media) steeds voorhanden is, zorgt ervoor, dat alle deeltjes gelijk en even sterk geladen zijn; hun onderlinge afstooting is een belangrijke factor voor de bestendigheid der systemen, hun ontleding leidt tot uitvloeking der disperse phase. In gassen kunnen ionen gevormd worden door de inwerking van ultraviolet licht, van Röntgenstralen of van radioactieve stralingen, door contact met heete lichamen, door wrijving met vaste of vloeibare oppervlakken, door chemische reacties of door electriche ontladingen. De natuurlijke ionisatie is echter steeds gering. (Ditzelfde geldt ook voor vloeibare niet geleidende media). Ze levert dragers van beiderlei teeken, die door de deeltjes vastgelegd worden, waaraan zij hun lading overgeven, op deze wijze groote ionen vormend. (Bij stofdeeltjes is dit geheel anders, zie blz. 23).

Men neemt aan, dat deze groote ionen (geladen aërosoldeeltjes) bestaan uit groepeerings van neutrale moleculen rond een geladen molecuul. Naast deze deeltjes is echter een in aantal sterk overwegende groep ongeladen deeltjes aanwezig. Typische rooken en chemische nevels dragen meestal geen bepaalde lading, zooals dikwijls is waargenomen. Wanneer we pasgevormden tabaksrook tusschen de platen van een geladen condensator onder den microscoop bekijken, zien we, dat

²⁰) De Broglie, *Compt. rend.* **146**, 624, 1010 (1908); **148**, 1315, 1163 (1909); *Bull. soc. franç. phys.* 67 (1909).

²¹) Millikan, *Phil. Mag.* (6) **19**, 209 (1910).

sommige deeltjes positief en andere negatief geladen zijn, terwijl de meeste deeltjes in 't geheel geen lading bezitten. Men ziet de kleinere deeltjes dan ook snel door vereeniging in grootte toenemen. De eerst blauwige rook verandert dan in een witten, bestaande uit grootere deeltjes, terwijl dan alle deeltjes gelijk geladen zijn. Eerst wanneer dit het geval is, kan een relatief stabiele toestand optreden.

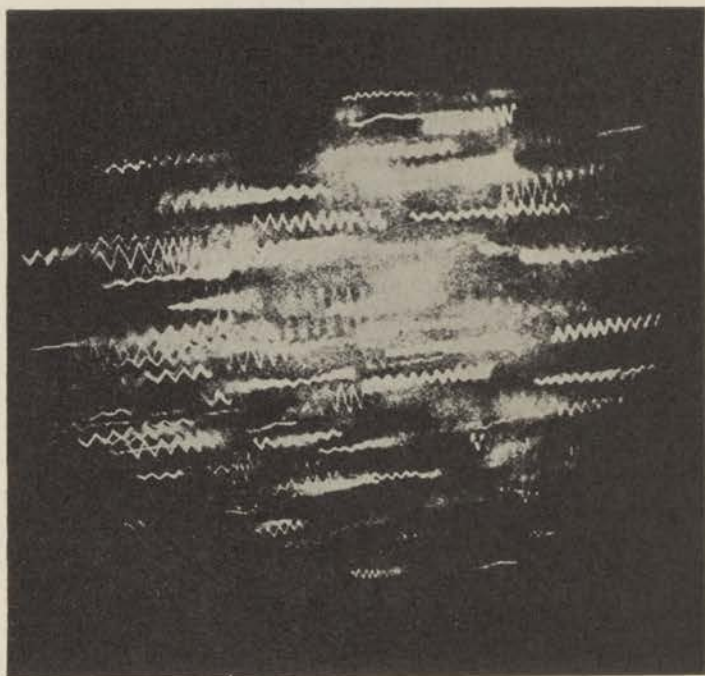


Fig. 2. Gedrag van rookdeeltjes in een wisselveld loodrecht op den belichtingskegel van een ultramicroscop.

Wells en Gerke.

De hierboven afgebeelde fig. van Wells en Gerke²²⁾ geeft een goed inzicht in den ladingstoestand der deeltjes van een rook. Zij toont ons rook (onder den ultramicroscop) in een wisselveld, dat loodrecht op den belichtingskegel staat; de

²²⁾ Wells and Gerke, J. Am. Chem. Soc. **41**, 312 (1919).

deeltjes verplaatsen zich dan onder de inwerking van het licht in de richting van den straal en tegelijk, tengevolge der oplading, die zij door natuurlijke ionisatie verkrijgen, in het veld met de periode zijner wisseling, zoodat een zigzagweg resulteert. De amplitude der trilling van een deeltje is een nauwkeurige maat voor den weg, dien het in een gegeven tijd onder de werking van een bekende kracht aflegt, waardoor de grootte bepaald kan worden. De figuur laat duidelijk zien, dat in een aërosol: 1^o. deeltjes van verschillende grootte en 2^o. naast geladen ook ongeladen deeltjes aanwezig zijn.

Stofdeeltjes hebben grootere afmetingen (van 10^{-5} tot 10^{-2} cm) dan rookdeeltjes en een vasten compacteren bouw; zij hebben, in tegenstelling met rookdeeltjes, meestal alle eenzelfde lading, welke afhankelijk is van den aard der stof en welke zij bij hun vorming reeds verkrijgen (zie blz. 23). Terwijl condensatie dus tot verschillende lading leidt, voert dispersie tot gelijke lading.

4. *Stabiliteit.*

De stabiliteit van een aërosol wordt bepaald:

1^o. door de grootte der deeltjes en

2^o. door het al of niet aanwezig zijn van een geadsorbeerd gashuidje of van elektrische ladingen op deze deeltjes.

Ad 1^o. De stabiliteit van een aërosol, in verband met de grootte der deeltjes, hebben we reeds nagegaan op blz. 16. We zagen daar reeds, dat deeltjes met een straal grooter dan 10^{-3} cm ($10\ \mu$) zoodanige valsnelheden hebben, dat ze snel sedimenteeren. De soldeeltjes, welke een dergelijk grootte hebben, zullen slechts zeer kort blijven zweven; het sol zal weldra slechts bestaan uit deeltjes kleiner dan $10\ \mu$.

Ad 2^o. De deeltjes van een pas gevormden rook of stofwolk zijn geneigd zich te vereenigen tengevolge van de intermoleculaire aantrekking, die er tusschen de oppervlaktmoleculen bestaat. Ze zijn ook geneigd moleculen of ionen uit het dispersiemedium te adsorbeeren. Welke werking waarschijnlijk zal plaatsvinden, wordt bepaald door de frequentie, waarmede de deeltjes met elkander en met de moleculen van

het dispersiemedium botsen. De aërosoldeeltjes bewegen, tengevolge van hun grootere massa, met veel kleinere snelheden dan de moleculen van het dispersiemedium. Daaruit volgt, dat het aantal botsingen tusschen de deeltjes van de disperse phase onderling veel geringer is dan het aantal botsingen, dat tusschen de moleculen en de deeltjes der disperse phase plaats vindt. Als dus de deeltjes geneigd zijn gasmoleculen te adsorbeeren, is het zeer waarschijnlijk, dat zij omgeven zullen worden door laagjes geadsorbeerd gas, nog vóór zij met elkaar botsen²³⁾.

Bij afwezigheid van een zoogenaamd indifferent gas, of indien het indifferente gas, dat aanwezig is, niet geadsorbeerd wordt door de deeltjes, terwijl evenmin andere stabiliteitsvoorwaarden aanwezig zijn, zullen de deeltjes zich snel vereenigen; het sol zal snel uitvlokken.

Als de gasmoleculen voldoende geadsorbeerd worden om een filmpje te vormen van b.v. 1 molecuul dik, zullen twee deeltjes, bij zoo dichte nadering, dat de gasfilmpjes elkaar raken, een wederzijdsche aantrekking op elkaar uitoefenen. Voorwaarde hierbij is, dat de deeltjes geen of een verschillende lading hebben (zooals bij rooken). De aantrekking bij de rooken zal het gevolg zijn van de cohaesiekrachten, welke er tusschen de aan elkaar rakende moleculen van de twee gasfilmpjes bestaat, en ook van de krachten, tusschen de deeltjes zelf; deze laatste worden echter belangrijk in intensiteit verminderd door den grooteren afstand, welke de deeltjes scheidt. In de meeste gevallen echter zijn de cohaesiekrachten toch nog vrij sterk, in het bijzonder, omdat, tengevolge van de sterke kromming van het oppervlak der deeltjes, de oppervlaktmoleculen een sterkere aantrekkende werking uitoefenen, dan de moleculen van een plat vlak. Door de aanwezigheid van het gasfilmpje zullen zulke aaneenplakkende deeltjes zich niet kunnen vereenigen; zij blijven los aan elkander verbonden, op deze wijze vlokke aggregaten vormend. Wanneer de gasmoleculen sterk geadsorbeerd worden, zal zelfs vlokvorming voorkomen worden en de aërosol zal dan een hoogen dispersiegraad

²³⁾ Engler and Wild, Ber. **29**, 1929 (1896).

blijven behouden; de deeltjes zullen dan slechts het systeem verlaten door diffusie naar de wanden en den bodem van het vat.

Bij stofwolken, waarvan altijd alle deeltjes gelijk geladen zijn, stooten deze elkaar af, ook hier zullen de deeltjes slechts het systeem verlaten door diffusie naar de wanden en den bodem.

De ladingen van stofdeeltjes kunnen op zeer verschillende wijze gevormd worden; daaronder is de vorming door wrijving van het deeltje met het dispersiemedium of met eenigen wand wel een der meest voorkomende mogelijkheden (zie blz. 84). Stofdeeltjes worden b.v. geladen, wanneer ze in een ruimte opgewarrend worden. Of de lading positief of negatief is, is afhankelijk van den aard der stof²⁴); metaaldeeltjes worden b.v. negatief geladen, niet-metaaldeeltjes positief. Stofdeeltjes, bestaande uit zuuroxyden of andere zuurvormende stoffen, worden positief, stofdeeltjes bestaande uit basische oxyden negatief geladen. In een zandstorm b.v. hebben we met positief geladen deeltjes te doen (tengevolge van de juist genoemde eigenschap van het SiO_2); in Engeland daarentegen is het meeste stof negatief geladen, omdat het van kalkachtige origine is. Wanneer regendruppels door den weerstand van de lucht fijn verdeeld zijn, hebben zij een positieve lading gekregen, terwijl de omgevende lucht negatief is geworden²⁵). Op dezelfde manier krijgt ook het water van een waterval een lading.

Het is duidelijk, dat een aërosol zal uitvlokken, door iedere inwerking van buiten af, welke de deeltjes van hun beschermende gashuidje en/of van hun lading berooft. Dit kan b.v. geschieden, door het aërosol electrisch te laden²⁶).

Ook kan een nevel of stofwolk worden uitgevlokt, wanneer hij gemengd wordt met één, waarvan de deeltjes een lading bezitten, tegengesteld aan die van het eerstgenoemde aërosol²⁷).

²⁴) Rudge, Phil. Mag. (6) **23**, 852 (1912); **25**, 481 (1913).

²⁵) Seeliger, Ann. Physik **31**, 500 (1905); De Broglie, Compt. rend. 1115 (1907); Koloman und Brunolak, Ann. Physik **39**, 497 (1913); Simpson, Phil. Mag. (6) **30**, 1 (1915).

²⁶) Rayleigh, Proc. Roy. Soc. **28**, 406 (1879); **29**, 71 (1879); **34**, 130 (1882); Newall, Phil. Mag. (5), **20**, 148 (1885); Burton and Wiegand, Phil. Mag. (6) **23**, 150 (1912).

²⁷) Gibbs, Brit. Pat. No. 129, 721 (1917).

Zelfs als het oorspronkelijke aërosol alleen neutrale deeltjes bevat, kan de toevoeging van een sol, waarvan de deeltjes een lading hebben, uitvlokking teweegbrengen, daar ook een neutraal en een geladen deeltje elkaar zullen aantrekken tengevolge van de geïnduceerde tegengestelde lading, welke het neutrale deeltje krijgt.

5. *Chemisch en fysisch onderzoek.*

Aan het chemisch onderzoek van de disperse phase moet voorafgaan een zorgvuldig microscopisch onderzoek van de deeltjes, om hun grootte, vorm, structuur en mate van gelijkvormigheid te bepalen. Voor dit onderzoek, evenals voor het bepalen van de chemische samenstelling, is het noodig de disperse phase te *concentreeren*. Men gaat daarbij uit van een groot monster, b.v. van een kubieken meter. Men kan de zwevende deeltjes zich laten afzetten in een daartoe geschikt vat, dat op een constante temperatuur gehouden kan worden, men kan een bepaald volume van een aërosol door een geschikt filter zuigen, waarin de disperse phase quantitatief van het dispersiemedium gescheiden kan worden, of men kan de deeltjes neerslaan langs electrostatischen weg. Het dispersiemedium kan dan opgevangen worden in een gashouder, om geanalyseerd te worden volgens de gewone gasanalytische methoden. De scheiding moet bij filtratie zoo snel mogelijk geschieden, om het verlies aan disperse phase, door afzetting op de wanden van het apparaat, tot een minimum te beperken.

De meeste scheidingsmethoden, welke men toepast, zijn ontworpen om het aantal en de samenstelling van rookdeeltjes in verbrandingsgassen te bepalen of in de atmosfeer, of om de hoeveelheid en de samenstelling van het stof te onderzoeken in mijn- of fabriekslucht.

De eenvoudigste vorm van *afzetting* is wel, dat men een plaat of open vat van een bepaalde oppervlakte, gedurende een bekenden tijd in met stofdeeltjes verontreinigde lucht of gas laat staan en dat men dan het stof weegt, dat zich heeft afgezet. Op deze wijze is het mogelijk, een hoeveelheid materiaal te verkrijgen, welke voldoende is voor een microscopisch en chemisch onderzoek. De hoeveelheid verzameld stof geeft

echter in geen enkel opzicht een maat voor de totale hoeveelheid materie, welke in een zeker volume lucht of gas is gesuspendeerd. Slechts krijgen we een gemiddelde waarde voor de hoeveelheid, die zich afzet per cm^2 oppervlakte per sec.

Filtratie, als methode voor het concentreeren van de disperse phase, is in wezen een bijzondere vorm van afzetten. Hierbij wordt een bekend volume van het aërosol door een filter gezogen en de hoeveelheid neerslag wordt bepaald door weging, of door vergelijking van de kleur, welke de gefiltreerde deeltjes op het filter hebben veroorzaakt, met standaardkleuren²⁸⁾. Het is heel moeilijk een filter te verkrijgen, dat de disperse phase geheel van het dispersiemedium scheidt. Een aërosol kan b.v. gemakkelijk een filter passeeren, waarin een gas geheel geadsorbeerd zou worden. Dit komt, omdat de relatief langzaam bewegende deeltjes van het aërosol veel minder dikwijls in contact komen met de wanden van de filtergaten dan de snelbewegende gasmoleculen. Concentratiebepalingen (quantitatieve) door filtratie voldoen dan ook slechts voor relatief grove aërosolen en dan nog het best voor zulke, waarin de concentratie van de disperse phase hoog is.

Verreweg de beste methode om deeltjes van het gas, waarin zij gesuspendeerd zijn, te scheiden, is wel die der *electrostatistische precipitatie*. Een apparaat, op dit principe berustend en geschikt voor gebruik in het laboratorium, is beschreven door Tolman²⁹⁾. Het apparaat bestaat uit een cilindrische anode, gemaakt van platina- of aluminiumblad, en een in de as van den cylinder aangebrachten draad, welke de ontladingselectrode vormt. Tusschen de beide elektroden vindt een stille ontlading plaats. Het aërosol wordt door het apparaat geleid met een bekende snelheid en de deeltjes van de disperse phase slaan op den cylinder neer. Het zoo verkregen neerslag kan gemakkelijk microscopisch en chemisch onderzocht worden. Het

²⁸⁾ Schwarz, *Gesundh. Ing.* **35**, 7 (1912); Nesbitt, *Chem. News* **106**, 235 (1913); Smyth, *J. Ind. Hygiene* **1**, 140 (1919); Monnett, *Chem. Met. Eng.* **1117** (1920); Trostel and Frevert, *J. Ind. Chem.* **15**, 232 (1923).

²⁹⁾ Tolman, Reyerson, Brookes and Smyth, *J. Am. Chem. Soc.* **41**, 587 (1919); Lamb, Wendt and Wilson, *Trans. Am. Electrochem. Soc.* **35**, 357 (1919).

apparaat kan bovendien zoo ingericht worden, dat het mogelijk is, het neerslag te bekijken, zooals het zich heeft afgezet op de electrode. De concentratie kan hier bepaald worden, door het volume van de hoeveelheid aërosol, welke het apparaat passeert, te meten, en de gewichtsvermeerdering van de cilindrische electrode te bepalen. Deze methode is zoowel bruikbaar voor vloeibare als voor vaste deeltjes.

Een toestel, dat een combinatie is van het boven beschreven apparaat met een filter, waarin dus de precipiteerende werking van een hoogspanningsontlading vereenigd is met een groot adsorbeerend oppervlak, is gebruikt door R. W. Gray³⁰⁾.

Wanneer de chemische samenstelling van een aërosol reeds bekend is, en het alleen noodzakelijk is, de *concentratie* van de disperse phase te *bepalen*, kan dit ook geschieden zonder dat de beide fasen gescheiden worden. Men meet dan de optische constanten van het aërosol, n.l., of de *intensiteit* van het *Tyndall-licht*, of het *doorlatend vermogen* van het aërosol *voor licht* van een standaardlichtbron. Tolman en Vliet³¹⁾ hebben een zeer geschikt instrument geconstrueerd, om de intensiteit van het Tyndall-licht te meten. De metingen hebben aangetoond, dat in het algemeen de intensiteit van het Tyndall-licht evenredig is met de concentratie van de disperse phase, mits de dispersiegraad bij de verschillende concentraties onveranderd blijft. Als we de concentratie van de disperse phase kennen, en ook de gemiddelde grootte der deeltjes (microscopisch onderzoek), is het mogelijk, wanneer de dichtheid van de gedispergeerde stof niet door de dispersie verandert, om het aantal deeltjes per cm^3 te berekenen. In werkelijkheid blijft echter de dichtheid, bij een hoogen graad van dispersie, niet onveranderd. Het is daarom van belang, dat we het *aantal deeltjes*, met een behoorlijken graad van nauwkeurigheid, door directe waarneming kunnen *tellen*.

Van grovere deeltjes (van microscopische grootte) kan ook het aantal per cm^3 bepaald worden, door op een voorwerp-glaasje alle deeltjes, welke in een bekend volume aanwezig

³⁰⁾ Whytlaw—Gray and Speakman, Proc. Roy. Soc. A **102**, 615 (1923).

³¹⁾ Tolman and Vliet, J. Am. Chem. Soc. **41**, 297, 575 (1919).

zijn, te doen bezinken. Deze kunnen dan gemeten en geteld³²⁾ worden. Deze methode is echter niet te gebruiken bij aërosolen met een hoogen dispersiegraad. Bij dergelijke systemen moeten de waarnemingen dikwijls plaatsvinden, onmiddellijk nadat die systemen gevormd zijn en gedurende de daaropvolgende perioden. In deze gevallen is het onmogelijk, de disperse phase van het dispersiemedium te scheiden, zonder geheel de grootte en het karakter der deeltjes te veranderen. Zulke systemen moeten daarom waargenomen worden als zoodanig, met behulp van een ultramicroscop.

Wanneer de deeltjes, welke de disperse phase vormen, grooter zijn dan 10^{-5} cm — de orde van grootte van de golflengte van het licht — zullen zij het licht weerkaatsen en breken op de gewone manier, en zullen zij relatief langzaam in het gezichtsveld bewegen. De grootte van zulke deeltjes is boven de oplossingsgrens van den microscoop en hun vorm en grootte zullen gemakkelijk waar te nemen zijn. De intensiteit van den Tyndallbundel is dan evenredig met de uitgebreidheid van het terugkaatsend oppervlak en met het aantal deeltjes per cm^3 . Dat wil dus zeggen, dat

$$I = k n d^2,$$

waarin k een constante is, d de diameter van het deeltje en n het aantal deeltjes per cm^3 .

Wanneer de deeltjes kleiner zijn dan 10^{-5} cm (zooals bij rooken het geval is) zijn ze te klein om het licht te weerkaatsen of te breken, ze zullen een deel van het licht, dat op hen valt, in alle richtingen verspreiden³³⁾. De grootte der deeltjes is beneden de oplossingsgrens van den microscoop, en het is dus onmogelijk hun vorm en grootte waar te nemen. Zulke deeltjes zijn in hevige Brownsche beweging. De intensiteit van het Tyndall-licht is nu evenredig met de zesde macht van den diameter, en ook weer met het aantal deeltjes per cm^3 . Hier is dus

$$I_1 = k_1 n d^6.$$

³²⁾ Aitken, Trans. Roy. Soc. Edinburgh **35** (1888).

³³⁾ Rayleigh, Phil. Mag. (4) **41**, 107, 274, 447 (1871); (5) **12**, 81 (1881); (5) **47**, 375 (1899).

Daar de concentratie (c) evenredig is met $n d^3$, kunnen we schrijven

$$I = \frac{kc}{d} \text{ en } I_1 = k_1 c d^3.$$

Voor een bepaalde concentratie is dus de intensiteit van het Tyndall-licht van een grover aërosol omgekeerd evenredig met den diameter van de deeltjes (den dispersiegraad), terwijl zij voor een fijner (hoogdispers) aërosol recht evenredig is met de derde macht van den diameter van de deeltjes. De intensiteit van het licht, dat door de deeltjes van een hoogdispers aërosol verstrooid wordt, neemt, wanneer de deeltjes kleiner worden, dus af met de derde macht van hun diameter. Het eenige verschil tusschen grootere en kleinere deeltjes in hoogdisperse aërosolen is daarom slechts gelegen in de helderheid, waarmede zij zich vertoonen in het veld van den ultramicroscoop en in de snelheid, waarmede zij in een bepaald gas bewegen. Zoo kunnen zelfs de kleinste deeltjes zichtbaar gemaakt worden, wanneer een voldoende donkere achtergrond wordt gebruikt.

HOOFDSTUK II.

De factoren, welke van invloed zijn op de explosiviteit van mengsels van brandbaar stof en lucht.

Als we bedenken, dat zoowel een explosief gas-lucht- als explosief stof-lucht-mengsel bestaat uit een mengsel van brandbare deeltjes in lucht (deeltjes in het eerste geval zoo klein, dat ze onzichtbaar zijn, en in het tweede geval 1000 tot 10.000 maal grooter en daardoor boven de zichtbaarheidsgrens), dan zal het ons niet verwonderen, dat er eenige factoren zijn, welke de explosiviteit zoowel van het eene als van het andere type beheerschen. Daarnaast treden echter bij stof-lucht-mengsels nog andere factoren op, welke samenhangen met de bijzondere eigenschappen van de stofdeeltjes.

We willen nu eerst onze aandacht schenken aan de factoren, welke zoowel bij gas- als bij stofexplosies een rol spelen, om vervolgens de factoren te behandelen, waarvan de explosiviteit van stofwolken bovendien afhankelijk is.

A. Factoren, welke zoowel bij gas- als bij stofexplosies een rol spelen.

In de eerste plaats is te verwachten, dat, evenals bij mengsels van brandbare gassen of dampen en lucht, ook bij stofwolken twee explosiegrenzen moeten bestaan. Terwijl bij stofexplosies de benedengrens in vele gevallen bepaald kon worden, gelukte het slechts in weinige gevallen ook de bovengrens vast te stellen. De concentratie bij de bovenexplosiegrens blijkt nl. zeer hoog te zijn. ¹⁾

¹⁾ Zie A. A. van der Dussen, dissertatie Leiden 1933, hoofdstuk III.

Het ligt voor de hand, dat de *intensiteit* van den ontsteker een rol speelt bij het al dan niet ontstoken worden van een stof-lucht-mengsel, evenals temperatuur en druk, factoren, die bij beide klassen van explosieve mengsels hun invloed doen gelden ²⁾.

Het mogelijke mechanisme van gas- en stofexplosies is reeds in andere Leidsche dissertaties ter sprake gebracht ³⁾; eveneens de overgang van explosies in detonaties ⁴⁾. Ik wil dan ook hier alleen even stilstaan bij de afhankelijkheid van de snelheid van een explosie van het percentage brandbare stof en bij den invloed van de chemische samenstelling op de ligging der explosiegrenzen.

De snelheid van een explosie is afhankelijk van het percentage brandbare stof in het mengsel, tenminste in eerste benadering. De snelheid zal in het algemeen het grootst zijn, wanneer het brandbare gas gemengd is met een hoeveelheid lucht, juist voldoende voor volledige verbranding van het gas.

Bij sommige gas-luchtmengsels is echter het geleidingsvermogen voor warmte van het brandbare gas aanmerkelijk grooter dan van lucht ⁵⁾. Indien er nu iets meer brandbaar gas aanwezig is, dan door de zuurstof verbrand kan worden, zal de ontwikkelde energie wel iets minder zijn, het geleidingsvermogen voor warmte neemt echter toe, zoodat de verbranding toch nog sneller verloopt. Bij mengsels van brandbare gassen met een groot geleidingsvermogen en lucht zal het punt van maximale explosiesnelheid dus bij een hooger percentage brandbaar gas zijn gelegen.

Van methaan-luchtmengsels geeft men op, dat de krachtigste explosies ontstaan met mengsels van $\pm 9.6\%$ methaan ⁶⁾.

²⁾ Zie A. A. van der Dussen, dissertatie Leiden 1933, hoofdstuk III.

³⁾ K. Posthumus, Over explosiegebieden van gasmengsels, diss. Leiden 1929; J. Booy, Over explosieve gasreacties, diss. Leiden 1930; A. A. van der Dussen, Stofontploffingen, diss. Leiden 1933; J. van Heiningen, Explosiegebieden, diss. Leiden 1934; W. P. M. Matla, Explosieve stofwolken, diss. Leiden 1935.

⁴⁾ J. H. A. P. Langen van der Valk, diss. Leiden 1927; A. A. van der Dussen, diss. Leiden 1933.

⁵⁾ O. C. de C. Ellis and W. A. Kirkby, Flame; London, 1936, 30.

⁶⁾ Price and Brown, Dust Explosions, Boston, 1923, p. 1.

Wanneer we nu berekenen, hoe de samenstelling moet zijn van een mengsel van lucht en methaan, zoodat het precies de hoeveelheid zuurstof bevat, noodig voor de volledige verbranding van al het methaan, dan zien we dat dit 9.4% methaan tegen 90.6% lucht is; inderdaad behoorlijk in overeenstemming met de boven opgegeven langs experimenteelen weg gevonden waarde.

Een bevredigende overeenstemming vinden we ook bij aethaan, aethyleen en acetyleen. Gevonden werd respectievelijk ± 6.2 , ± 7.5 en ± 9.3 %⁷⁾, berekend 5.6, 6.5 en 7.7% brandbaar gas.

Bij waterstof en koolmonoxyde, twee gassen met een groot geleidingsvermogen voor warmte, zijn de afwijkingen dientengevolge grooter. De grootste snelheden worden hier bij verbranding met lucht bereikt respectievelijk bij ± 39 en ± 46 %⁷⁾; berekening leverde voor beide 28.6% brandbaar gas.

Goede overeenstemming werd ook gevonden bij stofexplosies. Bij steenkoolpoeders met een benedenexplosiegrens van 23 mg per dm³ vond men het meest explosieve mengsel bij een concentratie van 123 mg per dm³⁸⁾. Nu leert de berekening, dat een koolstof-luchtmengsel met 109 mg zuivere koolstof per dm³ juist voldoende zuurstof bevat om de kool volledig te verbranden. Dit cijfer is in zeer goede overeenstemming met het voor steenkool gevondene, wanneer men bedenkt, dat een steenkool gemiddeld ± 75 % zuivere koolstof bevat en ± 3.7 % aan koolstof gebonden waterstof.

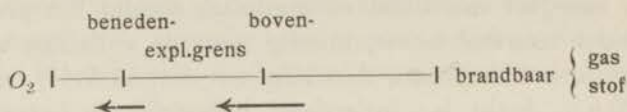
Wanneer men de explosiegrenzen nadert, wordt de explosie minder hevig.

De ligging van het gebied, waarbinnen een stof-lucht-mengsel of een gas-lucht-mengsel explosief is, wordt o.a. bepaald door de chemische samenstelling van het brandbare gas of het brandbare stof. Naarmate nl. een molecuul van het stof of het gas meer moleculen zuurstof noodig heeft voor zijn volledige verbranding, zullen hun explosiegrenzen zich meer in de richting van de zuurstof-as bewegen (de bovenexplosiegrens

⁷⁾ Ellis and Kirkby, Flame, p. 36.

⁸⁾ Price and Brown, p. 4.

het snelst, zoodat het gebied tevens kleiner wordt) (zie fig.).



Deze eigenschap is niet van toepassing op verbindingen, welke zuurstof bevatten, omdat dit element de stoffen meer brandbaar maakt en het explosiegebied vergroot; deze stoffen zullen benedenexplosiegrenzen hebben, welke lager zijn dan overeenkomt met het aantal moleculen gas, noodig voor volledige verbranding.

TABEL IIIa.

reagerende stoffen	explosiegrenzen	aantal mol. O_2 noodig voor verbr.
H_2 en lucht	92—31 $\frac{1}{10}$ lucht	$\frac{1}{2}$ mol.
CH_4 " "	95—87 $\frac{0}{10}$ " "	2 "
C_4H_{10} " "	98—93 $\frac{0}{10}$ " "	6 $\frac{1}{2}$ "

TABEL IIIb.

reagerende stoffen	benedengrens	aantal mol. O_2 noodig voor verbr.
kool en lucht	1.8 mol./l ¹⁰⁾	1 mol.
aluminium " "	1.0 " ¹¹⁾	$\frac{3}{4}$ "
zwavel " "	0.85 " ¹⁰⁾	1 "
diphenyl " "	0.26 " ¹¹⁾	14 $\frac{1}{2}$ "
suiker " "	0.19 " ¹¹⁾	6 "
anthraceen " "	0.11 " ¹¹⁾	16 $\frac{1}{2}$ "
picrinezuur " "	0.09 " ¹¹⁾	3 $\frac{1}{4}$ "

Ter illustratie van het boven gezegde dienen de tabellen IIIa en IIIb. In tabel IIIa zien we een daling van de explosiegrenzen in de richting van boven naar beneden, gepaard gaande met

⁹⁾ Van Heiningen, diss., p. 16, 23 en 27.

¹⁰⁾ Van der Dussen, diss., p. 156 en 172.

¹¹⁾ Matla, diss., p. 51, 53 en 57.

een stijging van het aantal moleculen zuurstof, noodig voor verbranding. Eenzelfde beeld brengt ons tabel IIIb, waarin een aantal poedervormige stoffen zijn vereenigd; men ziet verder duidelijk, dat suiker en picrinezuur uit den band springen; beide bevatten een aantal atomen zuurstof.

Tot de factoren, welke zoowel bij gas- als stofexplosies een rol spelen, behooren dus de volgende:

- 1^o. de mengverhouding van de brandbare stof en lucht;
- 2^o. de chemische samenstelling van de brandbare stof;
- 3^o. de intensiteit der ontsteking (slechts een ontstekingsbron van voldoende intensiteit kan de explosie inleiden).

B. Factoren, welke alleen (ook) bij stofexplosies een rol spelen.

Bij de onder A genoemde factoren, welke zoowel bij gas- als stofexplosies een rol spelen, komen nu nog de volgende factoren, welke alleen op de explosiviteit van *stof*-luchtmengsels hun invloed uitoefenen:

- 1^o. de grootte der deeltjes,
- 2^o. de cohaesie,
- 3^o. de verbrandingswarmte,
- 4^o. de vorm,
- 5^o. de hygroscopiciteit,
- 6^o. het aantal moleculen gas, dat bij verbranding gevormd wordt per molecuul brandbare stof,
- 7^o. de adsorbtie van zuurstof,
- 8^o. het asch- en watergehalte.

Het herkennen van den invloed van elk dezer factoren bij het beschouwen van de verkregen experimenteele resultaten is veel moeilijker dan bij gasexplosies. Geen wonder dus, dat van de invloeden, welke de verschillende factoren hebben, nog maar weinig bekend is. Systematische onderzoekingen, waarbij verschillende factoren constant worden gehouden en slechts één gevarieerd, zijn op dit gebied nog maar heel weinig verricht.

§§ 1 en 2. *De grootte der deeltjes en de cohaesie.*

Over het algemeen zal de explosiviteit van een stofwolk toenemen, wanneer de deeltjes kleiner worden ¹²⁾, daar de verbranding alleen aan het oppervlak plaats vindt. De verhouding oppervlak : volumen neemt nl. toe met afnemenden straal.

$$O : V = 4 \pi r^2 : \frac{4}{3} \pi r^3 = 3/r.$$

Wanneer het oppervlak grooter is, is de reactie sneller geëindigd; de aanwezige energie wordt in een korter tijdsbestek afgegeven; de temperatuur zal hooger zijn en de explosie zal zich sneller voortplanten.

Dat de explosiviteit van een stofwolk toeneemt wanneer de deeltjes kleiner worden, geldt echter slechts tot aan een zekere grens, welke niet voor alle stofsoorten gelijk is. Beneden de 50 μ treden, bij de eene stof eerder, bij de andere later, cohaesieverschijnselen op, verschijnselen, die we bij alle stoffen zonder uitzondering terugvinden, zoowel anorganische als organische stoffen vertoonen ze. De explosiviteit neemt *eerst* bij fijnere verdeling van de betreffende stof nog toe om daarna een maximum te bereiken en weer af te nemen tengevolge van het feit, dat de stof bij deze groote fijnheid niet meer goed verstuift samenbalt tot grootere deeltjes. Het maximum zal het eerst optreden bij de stof, welke de grootste cohaesie vertoont. Een stof met practisch geen cohaesie zal ook geen maximum in de explosiviteit-deeltjesgrootte-curve vertoonen.

Om in deze questie een beter inzicht te verkrijgen, heb ik de verschillende stoffen, waarmede ik experimenteerde, onderzocht op deze eigenschap en gerangschikt in een rij zoodanig, dat iedere volgende stof een geringere cohaesie vertoonde dan de voorgaande. Ik heb daartoe de verschillende stoffen in reageerbuisjes gebracht, welke ongeveer half gevuld werden en daarna afgesloten met een kurk. Door nu van twee stoffen na te gaan, welke het eerst afbrokkelde, wanneer de buisjes gelijktijdig heel langzaam in horizontale richting werden

¹²⁾ Ann. mines (7) 7, 180 (1875); (7) 20, 121 (1881); Z. Berg-Hütten-Salinenwesen 1920, 100.

gebracht, konden de stoffen in een rij worden gerangschikt. De verkregen rij van stoffen vinden we in tabel IV (deze

TABEL IV.

Cacao	
Melkpoeder	
Zwavel	
Suikerpoeder	
Roggemeel	
Harspoeder	
Tarwebloem	
Derrispoeder	
Aluminium	
Rijstbloem	
Mout	
Steenkool	
Aardappelmeel	
Dextrine	
Noriet	
Lycopodium	



grootere cohaesie

poeders behooren zonder uitzondering tot de stoffen, waarvan één of meer gevallen van hevige explosie bekend zijn). Het verschijnsel berust slechts voor een klein deel op hygroscopiciteit. Heel goed wordt het maximum, dat bij elke stof optreedt, geïllustreerd door een serie waarnemingen, gedaan door Price en Brown¹³⁾, welke zijn vereenigd in tabel V. Zij

TABEL V.

Soort van stof	grootte in μ			grootte in μ			grootte in μ			grootte in μ		
	grootte in μ	$\frac{0}{10}$ van het geheel	ontwikkelde druk	grootte in μ	$\frac{0}{10}$ van het geheel	ontwikkelde druk	grootte in μ	$\frac{0}{10}$ van het geheel	ontwikkelde druk	grootte in μ	$\frac{0}{10}$ van het geheel	ontwikkelde druk
Cacao	—	—	—	26-	8.9	4.2	42-26	45.9	9.8	56-42	14.6	10.2
Tarwebloem	—	—	—	26-	12.8	9.8	41-26	20.7	11.4	64-41	12.9	11.1
Hout	21-	14.2	10.4	32-21	18.1	11.8	49-32	53.4	11.2	—	—	—
Mout	—	—	—	26-	39.8	10.7	46-26	28.7	10.5	81-46	11.4	8.9
Maizena	18-	13.2	12.6	25-18	33.2	12.5	46-25	31.6	10.7	—	—	—
Aardappelm.	—	—	—	22-	3.6	12.1	33-22	13.8	8.9	48-33	29.9	0.9
Kool	—	—	—	28-	3.7	12.6	48-28	28.3	10.9	71-48	20.0	7.2

¹³⁾ Price and Brown, Dust Explosions, National Fire Protect. Ass., Boston, Mass., 1923, p. 47—51.

hebben de fracties van verschillende poedervormige stoffen, welke een zeef van 200 mazen per inch (90/cm) hadden gepasseerd, in een door hen geconstrueerd apparaat (zie fig. 5; beschrijving zie blz. 43) door middel van een luchtstroom weten te scheiden in 4 fracties van respectievelijk ± 15 , ± 20 , ± 38 , $\pm 56 \mu$ doorsnede. Van elk dezer verschillende fracties hebben zij de explosiviteit bepaald door den optredenden druk te meten (zie blz. 51). Het bleek, zooals uit de tabel te zien is, dat deze in de meeste gevallen niet voor de fijnste fractie, doch voor de op één na fijnste het grootst was. Dit was o.a. het geval bij cacao, tarwebloem en hout. Bij mout en maizena loopt het laatste deel der explosiviteit-deeltjesgrootte-curve ongeveer horizontaal, terwijl bij kool en aardappelmeel boven 20μ nog geen maximum in de curve optreedt.

Ik bracht nu de curven van deze verschillende stoffen in één figuur samen (zie fig. 3). Letten we er op, bij welke grootte der deeltjes de verschillende maxima liggen, d.w.z. bij welke grootte de verschillende stoffen het meest explosief zijn, dan zien we, dat dit van grootere naar kleinere deeltjesgrootte achtereenvolgens het geval is voor cacao, bloem, hout, mout, maizena, kool en aardappelmeel. Wanneer we deze stoffenrij vergelijken met die in tabel IV, dan zien we, dat de volgorden geheel gelijk zijn. Bij de sterkst samenballende stof doet zich deze invloed dus ook het eerst gelden en bereiken we reeds bij een grootte van $\pm 50 \mu$ de grootste explosiviteit. Bij aardappelmeel, de minst plakkende dezer stoffen, is het maximum, dus het punt waar de cohaesie zijn invloed begint te doen gelden bij 20μ nog niet bereikt. We zien dus, dat, naarmate de cohaesie afneemt, de explosieve eigenschappen tengevolge van de kleinheid der deeltjes meer en meer op den voorgrond treden. Daar bij de sterk samenballende stoffen de fijnste fractie een explosieremmenden invloed uitoefent, terwijl bij de minst plakkende stoffen deze fractie juist een explosiebevorderende werking heeft, behoeft het ons niet te verbazen, dat de hoogte der toppen langzamerhand toeneemt in de richting der weinig samenballende stoffen (mout voldoet niet aan dezen eisch). Men kan dit in fig. 3 duidelijk zien. Het maximum bij cacao ligt het laagst, dat bij aardappelmeel zal het hoogst

liggen. Op deze wijze komen we tot de conclusie, dat de meest explosieve stof *die* zal zijn met de geringste cohesie en de kleinste deeltjesgrootte. De meest explosieve stof, welke wij kennen, het lycopodium, heeft inderdaad de geringste cohesie, maar niet de kleinste deeltjesgrootte.

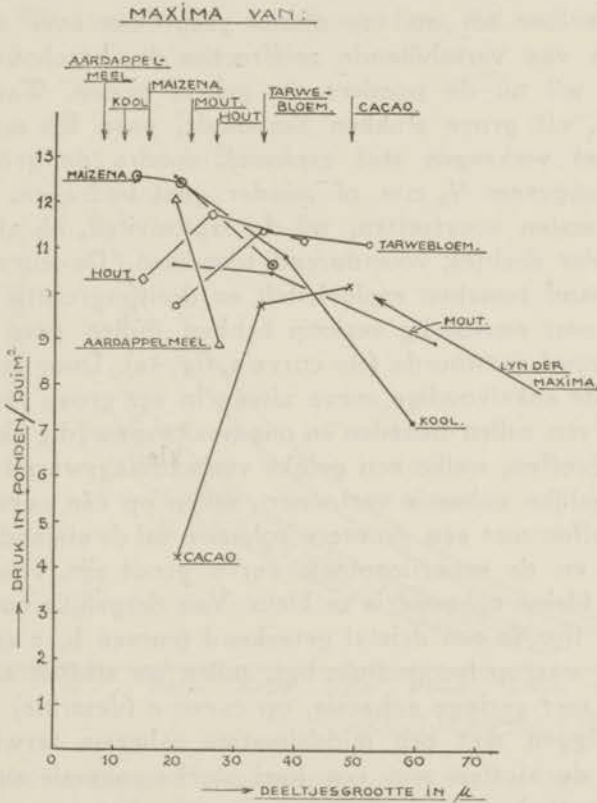


Fig. 3. Ligging der maxima in de explosiviteit-deeltjesgrootte-curve van eenige stoffen.

De deeltjes van lycopodium zijn 30 μ groot (voor bepaling der deeltjesgrootte, zie blz. 44). Zou het mogelijk zijn deze deeltjes tot grotere fijnheid te brengen, zonder de cohesie te doen toenemen, dan zou men nog een sterke toeneming in de explosiviteit mogen verwachten. Zulk een fijne verdeeling vinden we bij gassen, waar de verdeeling moleculair is, terwijl

er geen noemenswaardige cohaesie-effecten (associatie-effecten) optreden. De explosiedruk bij gasexplosies is dan ook steeds hooger dan de bij stofexplosies gemetene, wanneer bij beide reacties een even groot aantal moleculen gas gewonnen worden of verloren gaan bij de verbranding van 1 molecuul gas of vaste stof.

Ik heb hier tot nu toe steeds gesproken over de eigenschappen van verschillende zeeffracties der beschouwde poeders. Ik wil nu de poeders als geheel bezien. Wanneer we een stof, uit grove stukken bestaande, gaan fijn malen, dan wordt het verkregen stof explosief, zoodra de grootte der deeltjes ongeveer $\frac{1}{2}$ mm of minder gaat bedragen. Wanneer we het malen voortzetten, zal de explosiviteit, bij afnemende grootte der deeltjes, voortdurend toenemen. De curve, welke het verband tusschen explosiviteit en deeltjesgrootte aangeeft, zou een zeer eenvoudig verloop hebben, indien geen cohaesie den eenvoud verstoorde (zie curve a, fig. 4a). Door de cohaesie valt nu de enkelvoudige curve uiteen in een groep van curven. Deze curven zullen beneden en ongeveer evenwijdig aan curve a loopen. Stoffen, welke een gelijke verbrandingswarmte hebben en een gelijke cohaesie vertoonen, zullen op één curve liggen. Voor stoffen met een grootere cohaesie zal de afstand tusschen curve a en de experimenteele curve groot zijn, voor stoffen met een kleine cohaesie is ze klein. Van dergelijke curven heb ik er in fig. 4a een drietal geteekend (curven b, c en d). Op curve b, waarop lycopodium ligt, zullen we stoffen aantreffen met een zeer geringe cohaesie, op curve c (dextrine) zullen de stoffen liggen met een middelmatige cohaesie, terwijl we op curve d de stoffen met een heel sterke cohaesie zullen aantreffen (cacao).

Van de door mij onderzochte stoffen vertoont alleen lycopodium een sterk afwijkende cohaesie, nl. een zeer kleine. De cohaesie liep van de meeste stoffen, waarvan ik haar bepaalde, echter niet sterk uiteen. We zullen deze stoffen moeten rangschikken tusschen de curve met middelmatige en die met sterke cohaesie; we zullen hen moeten aantreffen in het gebied tusschen de curven c en d (zie fig. 4a).

Zooals we zagen, geldt in het algemeen, dat de samen-

ballende eigenschappen bij een bepaalde stof sterker naar voren komen naarmate de deeltjes dier stof gemiddeld kleiner zijn. Wanneer we *verschillende* stoffen vergelijken, is dit echter niet juist. Iedere stof heeft nl. zijn eigen specifieke cohaesie, die voor sommige stoffen met gemiddeld kleinere deeltjes kleiner kan zijn dan voor andere stoffen met gemiddeld grotere deeltjes. We zien dit b.v. aan lycopodium, dat met een deeltjes-

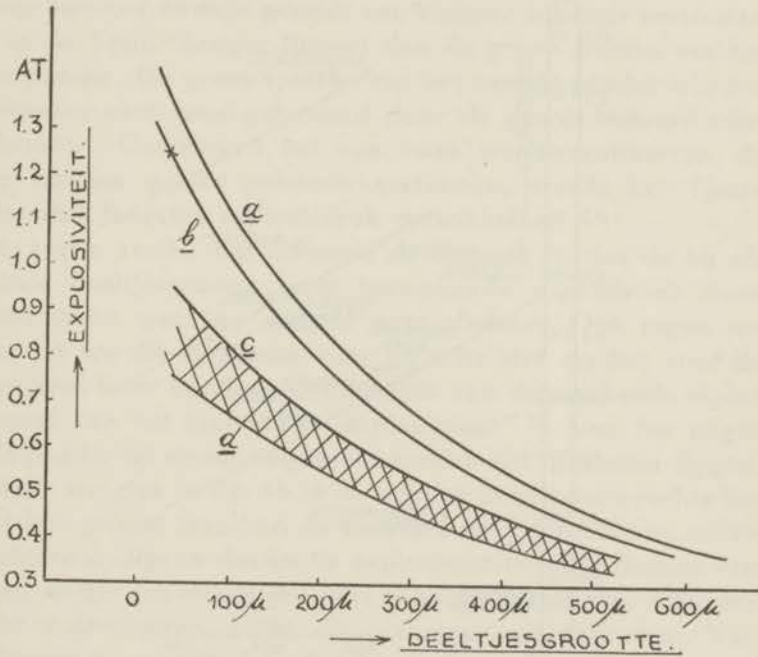


Fig. 4a. a. Explosiviteit-deeltjesgrootte-curve van een ideale stof; b, c en d. dezelfde curven voor stoffen met resp. geringe, middelmatige en sterke cohaesie.

grootte van 30μ , welke kleiner is dan de gemiddelde deeltjesgrootte van b.v. aluminium en suiker (38 en 37μ), toch een geringer plakkend vermogen bezit, dan deze laatste twee stoffen.

In figuur 4b heb ik nu van verschillende stoffen, waarmede ik geëxperimenteerd heb, de bij explosie ontwikkelde drukken

uitgezet tegen de deeltjesgrootte¹⁴⁾. Daar de bij de explosie ontwikkelde druk van de vermelde stoffen nauwkeurig bepaald is, is de ligging der verschillende stoffen in verticale richting precies bekend. In horizontale richting is de ligging van het punt echter niet zoo goed aan te geven. De gemiddelde deeltjesgrootte wordt nl. verkregen door uittelling van micro-

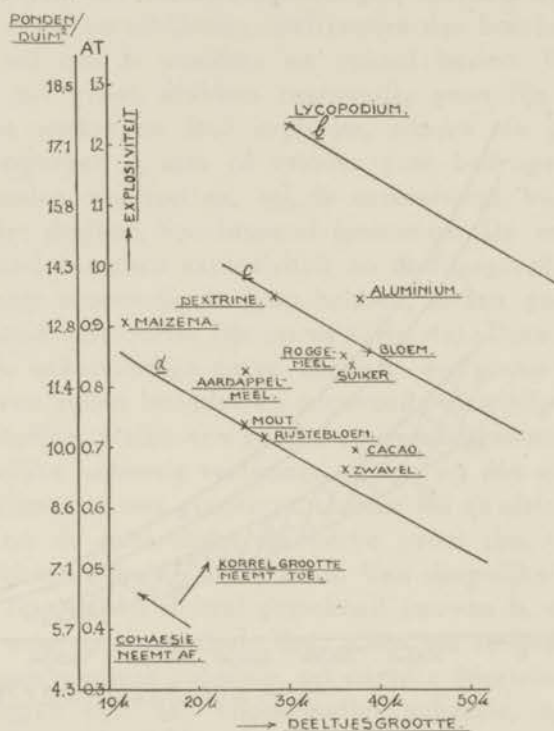


Fig. 4b. De ligging der onderzochte stoffen tusschen de schematische explosiviteit-deeltjesgrootte-curven (de curven zijn geteekend zonder rekening te houden met de maxima tengevolge van de cohaesie).

photo's en van praeparaten onder den microscoop. Dit levert echter steeds waarden op, die iets verschillen. Het punt wordt dan verkregen door deze te middelen. In horizontale richting is er dus steeds een zekere variatiebreedte.

¹⁴⁾ Price and Brown, p. 26,

We willen ons nu eerst een oogenblik met de koolhydraten alleen bezighouden. Wanneer we deze poeders onderling vergelijken, zooals zij in de natuur voorkomen, dan zien we, dat sommige daarvan zijn samengesteld uit een *grote hoeveelheid grove deeltjes* naast een geringe hoeveelheid kleine, terwijl andere juist een *geringe hoeveelheid grove deeltjes* bevatten naast een groote hoeveelheid fijne. Hebben deze poeders nu een gelijke cohaesie, als geheel genomen, dan zullen de grove fracties van het tweede poeder een kleinere cohaesie vertoonen (dus in de figuur hooger liggen) dan de grove fracties van het eerste poeder. De grove fracties van het tweede poeder worden dan immers niet meer gehinderd door de groote hoeveelheden fijn poeder. Omgekeerd zal van twee poeders, waarvan de grove fracties gelijke cohaesie vertoonen, steeds het fijnste poeder den laagsten explosiedruk ontwikkelen.

We zagen reeds, dat cohaesie de oorzaak is, dat de bij afnemende deeltjesgrootte eerst toenemende explosiviteit door een maximum gaat en daarna weer afneemt. Ook zagen we reeds, dat we dit maximum voor de eene stof eerder, voor de andere stof later bereiken, afhankelijk van de plakkende eigenschappen van het stof. Het „explosiepunt”¹⁵⁾ van het ongezeefde poeder zal steeds ongeveer beneden dit maximum liggen. Wanneer we dus in fig. 4b in de richting links boven-rechts beneden het gebied tusschen de curven c en d doorloopen, zullen we achtereenvolgens daarin de explosiepunten tegenkomen van stoffen, welke een steeds grootere cohaesie vertoonen. Wanneer we dit controleeren, blijkt dit volkomen uit te komen. Van links boven naar rechts beneden vinden we inderdaad een toenemende cohaesie, nl. achtereenvolgens de explosiepunten van lycopodium, maizena, dextrine, aardappelmeel, mout, rijstbloem, aluminium, tarwebloem, roggemeel, suiker, zwavel en cacao.

Daar maizena, de fijnverdeelde stof uit deze groep met de geringste cohaesie, reeds in de buurt van curve d is gelegen, zullen alle fijne poeders daar te vinden moeten zijn. Inderdaad liggen aardappelmeel, mout en rijstbloem alle drie bij de d-

¹⁵⁾ Met het explosiepunt van een poeder bedoelen wij in fig. 4b dat punt, hetwelk den druk aangeeft, dien het betreffende poeder ontwikkelt bij verbranding.

lijn. Dat we ook cacao daar aantreffen moet toegeschreven worden aan de zeer groote cohaesie van deze stof. De overige grove poeders (dextrine, suiker, roggemeel, tarwebloem) zijn alle in de buurt van curve c te vinden.

Fig. 4c geeft tenslotte een schematische voorstelling van het verloop der verschillende explosiviteit-deeltjesgrootte-curven. De hooge ligging van aluminium en de lage ligging van zwavel hangt samen met hun verbrandigswarmte (zie blz. 45).

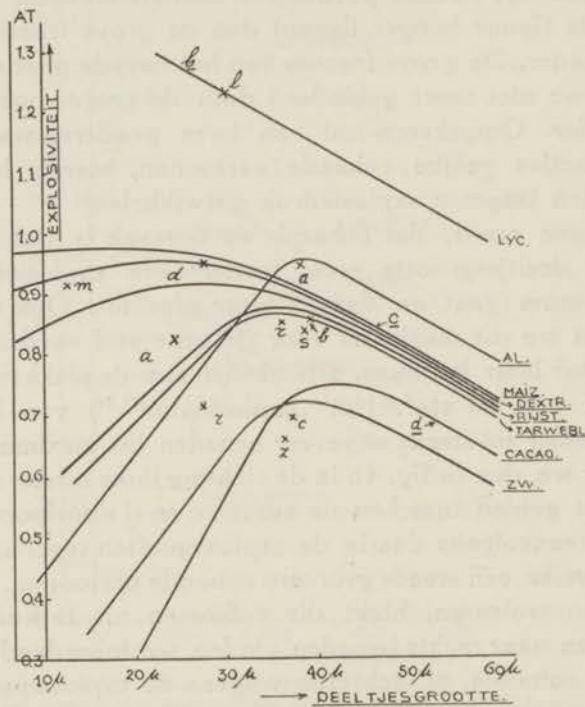


Fig. 4c. Waarschijnlijke ligging der maxima in de explosiviteit-deeltjesgrootte-curven van de door ons onderzochte stoffen.

In de meeste boeken over stofexplosies wordt aan de cohaesie min of meer voorbij gegaan. Het aantal onderzoekingen, dat verricht werd in het gebied, waarin deze cohaesie een groote rol speelt ($< 50 \mu$), is zeer gering. De meeste onderzoekingen, welke verricht zijn om den invloed van de grootte der stofdeeltjes op de explosiviteit te bepalen, geschieden met veel

grovere poeders (50—500 μ), waarbij men steeds een toenemende explosiviteit bij kleinere deeltjesgrootte vond. Dit is b.v. ook het geval bij de onderzoeken van Steinbrecher¹⁶⁾. Hij gebruikte zeven van 5800 mazen/cm² voor de grovere fracties en zeven van 11000 mazen/cm² voor de fijnste fracties. Voor één maas en één draad is in deze fijnste zeef beschikbaar 92 μ ; bij een dergelijke zeef is de dikte van den draad meestal ongeveer 40 μ dik; er blijft voor de deeltjes dus een doorsnede van ongeveer 50 μ over. Uit deze beschouwing blijkt dus, dat ook de onderzoeken van Steinbrecher ophielden aan den rand van het meest gevaarlijke gebied. Alle zeer gevaarlijke stofsoorten hebben nl. een gemiddelde deeltjesgrootte, welke gelegen is tusschen ± 10 en ± 40 μ , terwijl de stoffen welke in de wereldhuishouding in enorme hoeveelheden worden verwerkt (suiker, melen, enz.) bijna alle gemiddelde deeltjesgrootten hebben, welke liggen binnen dit gebied.

Het is echter wel begrijpelijk, dat het aantal experimenten op het gebied beneden 50 μ kleiner is, want men kan deze deeltjes niet meer in verschillende fracties scheiden door zeven. De scheiding moet geschieden door middel van luchtstreaming in apparaten, zooals afgebeeld in fig. 5¹⁷⁾. Dit apparaat bestaat uit een trechter, welke in verticalen stand aan een lange buis verbonden is. Het middelste deel dezer buis is 75 cm lang en 15 cm in doorsnee. Aan de bovenzijde is de buis versmald tot 9 cm diameter en heeft onder 45° een elleboog, waaronder een bakje is geplaatst om het stof op te vangen, dat in de buis naar boven geblazen wordt. Om een poeder te scheiden wordt een zekere hoeveelheid stof in den trechter gebracht (25 à 50 g). Het wordt dan opgewerveld door lucht onder een druk van 1 pond/duim² onder in den trechter te blazen. De verschillende scheidingen worden bereikt door de snelheid van den luchtstroom te regelen door tusschen den trechter en het luchtdrukreservoir een doorboorde plaat aan te brengen met grootere of kleinere opening.

¹⁶⁾ Van der Dussen, diss., p. 32.

¹⁷⁾ U. S. Bureau of Standards, Technical Paper No. 48; Price and Brown, p. 46.

Omdat het bij deze en andere proeven van het grootste belang was om den vorm en gemiddelde grootte der verschillende explosieve stofsoorten te leeren kennen, heb ik op het Geologisch-Mineralogisch Instituut te Leiden een serie microphoto's gemaakt van explosieve stofsoorten. Van deze photo's vindt

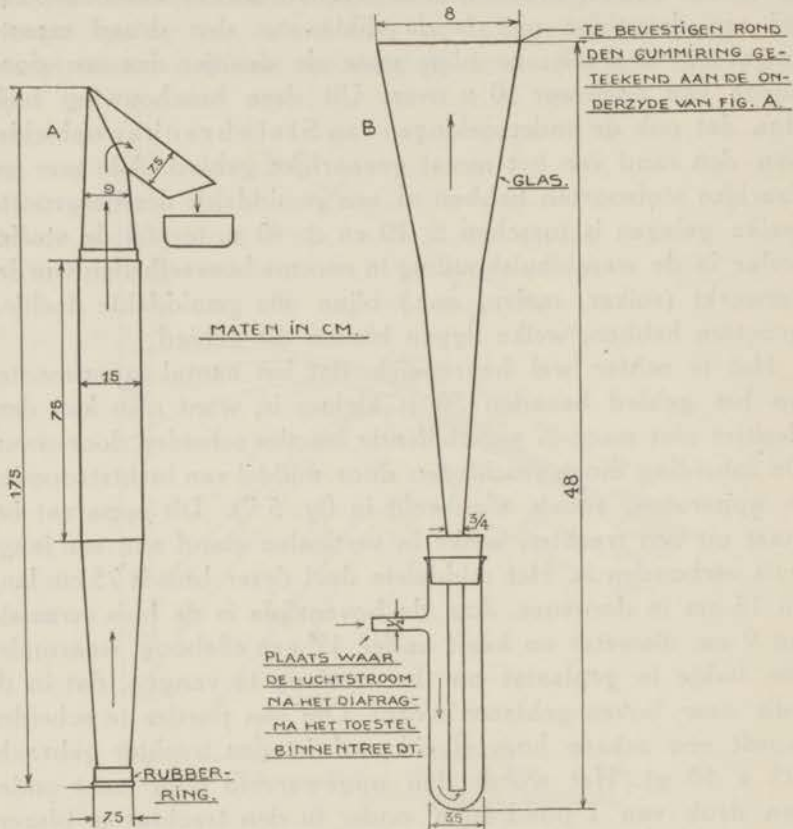


Fig. 5. Apparaat voor de scheiding van zeer fijne poeders ($< 50 \mu$) in fracties met verschillende diameter.

men in figuur 6 gedeelten van de meest karakteristieke onder hen weergegeven. Door uitmeting met een in dezelfde verhouding vergroote schaalverdeling, welke was verdeeld in honderdste delen van millimeters, werd van iedere plaat bepaald hoeveel deeltjes er van elke grootte op voorkwamen

Hieruit berekende ik een gemiddelde deeltjesgrootte, waarbij in aanmerking genomen moest worden, dat een grooter deeltje in staat is bij verdeling 1000 deeltjes te leveren met een doorsnede welke $\frac{1}{10}$ is van het oorspronkelijke deeltje. Om de kleinere deeltjes dus niet in een onrechtmatig bevoordeelde positie te brengen, moest hun aantal steeds gedeeld worden door factoren, welke de derde macht waren van de grootteverhouding. Daar echter de kleinere deeltjes bij de explosies steeds een grootere rol spelen (meer tot de explosiviteit bijdragen) dan de grootere, is deze achteruitzetting der kleinere deeltjes te groot. Ik heb daarom de aantallen deeltjes niet gedeeld door de derde macht van de verhouding der grootten, maar door de eerste macht dier verhouding. Op deze wijze kwamen we voor de in tabel VI genoemde stoffen tot de erachter genoemde deeltjesgrootten.

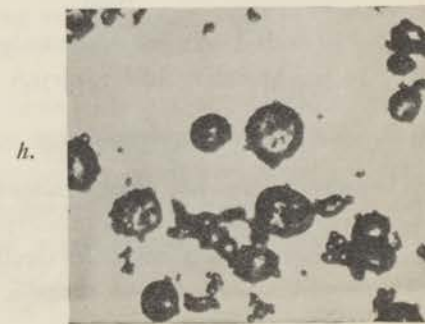
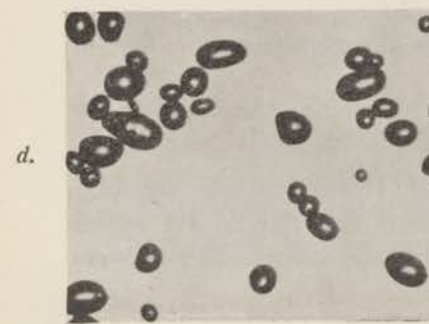
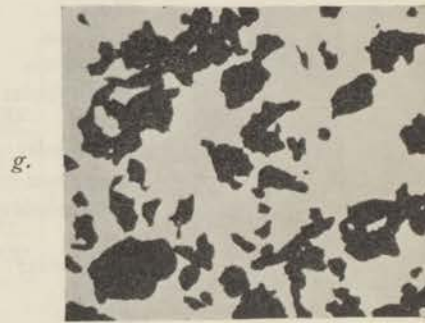
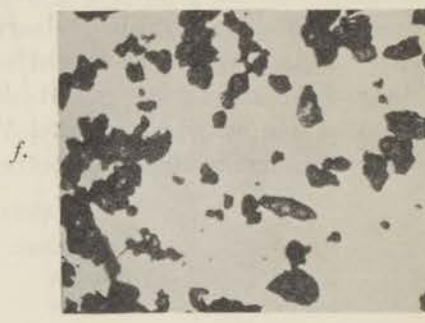
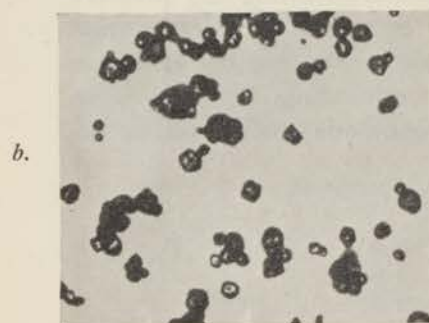
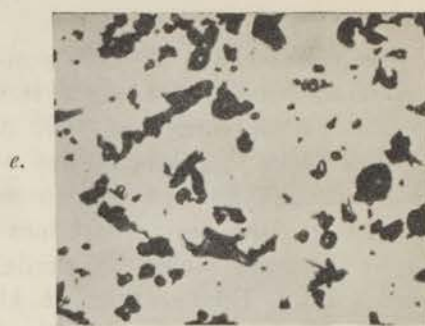
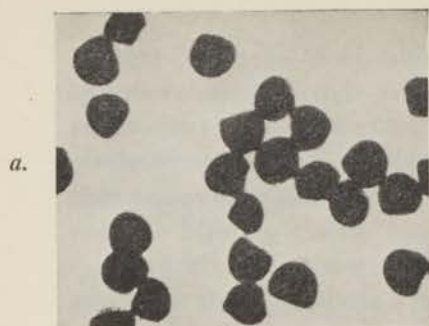
TABEL VI.

Lycopodium	30 μ
Maizena	12 μ
Dextrine	28 μ
Aardappelmeel	24 μ
Mout	25 μ
Rijstmeel	27 μ
Aluminium	38 μ
Derrispoeder	22 μ
Bloem	39 μ
Harspoeder	44 μ
Roggemeel	36 μ
Suikerpoeder	37 μ
Zwavel	36 μ
Melkpoeder	32 μ
Cacao	37 μ
Kurk	45 μ
Hout	54 μ

De in tabel VI gekozen volgorde hangt samen met het in § 4 te behandelen onderwerp.

§ 3. *Verbrandingswarmte.*

Wanneer we het mechanisme der stofexplosie in het oog nemen en zien, dat de voortplanting der reactie tot stand komt, doordat een bepaald deeltje bij zijn verbranding zooveel



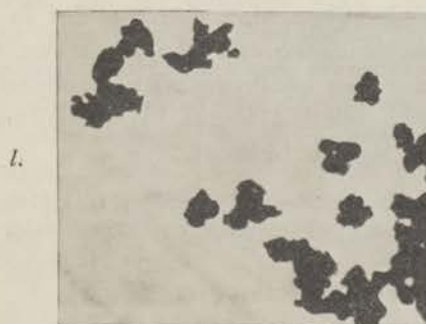


Fig. 6.

(Vergrooting 200 ×)

- a.* Lycopodium.
- b.* Maismeel.
- c.* Dextrine.
- d.* Aardappelmeel.
- e.* Mout.
- f.* Rijstmeel.
- g.* Aluminium.
- h.* Roggemeel.
- i.* Tarwebloem.
- j.* Suiker.
- k.* Zwavel.
- l.* Cacao.

warmte afgeeft, dat naburige deeltjes ook ontstoken worden, ligt het voor de hand te veronderstellen, dat de verbrandingswarmte bij het voortschrijden dezer explosieve reactie een zeer belangrijke rol zal spelen, met andere woorden voor een deel de grootere of kleinere explosiviteit der stoffen in lucht zal bepalen. Om na te gaan in welke mate dit het geval is, heb ik de verschillende stoffen, waarover mijn onderzoekingen loopen, gerangschikt volgens afdalende verbrandingswarmte. Wanneer we nu de waarden in tabel VII nader beschouwen,

TABEL VII ¹⁸⁾.

Kool	7800
Aluminium	7000
Cacao	4800
Zetmeel	4180
Cellulose	4180
Dextrine	4112
Hout	4100
Suiker	3950
Gerst	3630
Maizena	3600
Bloem	3530
Rijstbloem	3500
Roggemeel	3300
Zwavel	2280

zien we, dat we de stoffen in drie groepen zouden kunnen samenvatten, nl.:

1^o. de stoffen met hoge verbrandingswarmte (kool, aluminium en cacao);

2^o. de stoffen met middelmatige verbrandingswarmte (alle koolhydraten en cellulose) en

3^o. zwavel, welke laatste stof een zeer kleine verbrandingswarmte heeft.

Wanneer we nu fig. 4b bekijken, dan zien we, dat in het geheel niet kool, aluminium of cacao aan den top staan, wat de explosiviteit betreft, maar een koolhydraat, nl. lycopodium (verbrandingswarmte waarschijnlijk ± 4150 cal. ¹⁹⁾), terwijl cacao zelfs tot de minst explosieve stoffen behoort.

¹⁸⁾ Landolt-Börnstein; Lange, Handbook of Chemistry, 1934, 514—521.

¹⁹⁾ Lycopodium bestaat hoofdzakelijk uit cellulose en zetmeel, beide met een verbrandingswarmte van 4180 cal.

In de §§ 1 en 2 van dit hoofdstuk hebben we gezien, dat dit toegeschreven moet worden aan het feit, dat lycopodium zulk een buitengewoon geringe en cacao zulk een sterke cohaesie vertoont. De explosiviteit van deze laatste stof is daardoor ongeveer gelijk aan die van zwavel, welke stof een zeer geringe verbrandingswarmte heeft.

We zien dus, dat de explosiviteit in eerste instantie bepaald wordt door de deeltjesgrootte en de cohaesie, terwijl daarnaast de verbrandingswarmte een kleinere rol speelt.

In de §§ 1 en 2 van dit hoofdstuk hebben we de stoffen in twee groepen verdeeld naar de grootte van hun cohaesie. De verbrandingswarmte zal in elk dezer groepen een zoodanigen invloed hebben, dat de stoffen met een hooge verbrandingswarmte iets hooger in de groep komen te liggen dan overeenkomt met hun cohaesie. Het omgekeerde is het geval met de stoffen met een lage verbrandingswarmte. In de groep van stoffen met middelmatige tot sterke cohaesie zien we dan ook dat aluminium geheel aan de bovenzijde ligt, terwijl zwavel op de benedengrens haar plaats vindt. Wat de cohaesie betreft zou aluminium tusschen rijst en tarwebloem en zwavel tusschen suiker en cacao moeten liggen. Bij het stoffenpaar suiker en bloem blijkt de hoogere verbrandingswarmte van suiker niet in staat te zijn de grootere cohaesie te niet te doen; haar plaats is lager dan die van bloem.

§ 4. *De vorm.*

Wanneer we de microphoto's van de verschillende explosieve stoffen, welke zoodanig gerangschikt zijn, dat elke volgende stof een grootere cohaesie vertoont dan de voorgaande (zie blz. 35), met elkaar vergelijken, ontkomen we niet aan den indruk, dat de cohaesie voor een groot deel bepaald wordt door den vorm. De ronde of rondachtige deeltjes, waaruit sommige stoffen bestaan, vertoonen een veel geringere cohaesie dan de hoekige, waaruit andere poeders zijn samengesteld. Dit moet toegeschreven worden aan het feit, dat de rondachtige deeltjes in de natuur als zoodanig gevormd en dus gaaf zijn, terwijl de hoekige deeltjes van andere stoffen in wezen slechts uit brokstukken bestaan. Deze laatste deeltjes

zullen met hun ribben en hoeken een veel sterkere attractie, zoowel op elkaar als op vocht, uitoefenen dan de ronde. Bovendien zullen ze elkaar meer in hun bewegingen belemmeren. Tot de stoffen met rondachtige deeltjes, welke dus het meest explosief zijn, behooren lycopodium, dextrine, maizena en aardappelmeel (zie photo's). Roggemeel en tarwebloem zijn minder regelmatig gevormd.

Hoekige en kantige deeltjes bezitten o.a. aluminium, suiker, zwavel en cacao, welke stoffen alle een sterkere cohaesie vertoonen.

We zien dus, dat het in hoofdzaak de vorm is, welke den achtergrond vormt van de cohaesie. Het „ideale” explosieve deeltje zal dus rond moeten zijn en zeer klein ($< 10 \mu$) en zal weinig of geen cohaesie mogen vertoonen.

§ 5. *De hygroschopicitet.*

De cohaesie zal verder voor een deel bepaald worden door de hygroschopische eigenschappen van het deeltje. Wanneer we de stoffen drogen bij 100° C., zooals Price en Brown hebben gedaan²⁰⁾, valt de hygroschopische factor weg en houden we den anderen (Coulombsche aantrekking, afhankelijk van den vorm) over. De curven, welke de poeders dan vertoonen, zullen dichter de theoretische explosiviteit-deeltjes-grootte-curve naderen. Toch doet de overgebleven factor ook nu in sommige curven nog een top of een horizontaal gedeelte optreden (zie de curven van hout, tarwemeel, mout en cacao in fig. 7).

Deze onderzoekingen zijn speciaal van belang voor gevallen, waarin het stof verwerkt wordt of voorkomt in droge warme ruimten. Dit is b.v. het geval bij de droging van dextrine; het stof dat zich in de droogtrommels na eenigen tijd vormt is aanmerkelijk gevaarlijker dan het uitgangproduct.

Verdere factoren, welke van invloed zijn op de explosiviteit van verschillende poedervormige stoffen zijn de volgende:

²⁰⁾ Price en Brown, Dust Explosions, National Fire Protect. Ass., Boston, Mass., 1923, p. 47—51.

§ 6. *het aantal moleculen gas, dat bij verbranding gevormd wordt per molecuul brandbaar stof.*

Stofexplosies zijn in het bijzonder daarom zoo gevreesd, omdat bij deze reacties, wanneer ze in min of meer gesloten ruimten plaatsvinden, zeer snel enorm hoge drukken optreden.

Voor het bepalen van de relatieve gevaarlijkheid van verschillende explosieve poeders kan men in het algemeen twee

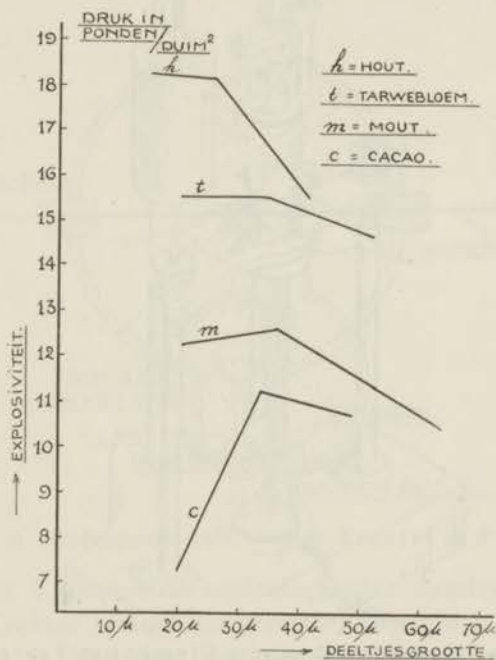


Fig. 7. Explosiviteit-deeltjesgrootte-curve van eenige stoffen, die ook na droging bij 100° C. nog een maximum in deze curve vertoonen.

wegen volgen, en wel *a*: men kan den druk meten, welke bij explosieve verbranding van een bepaalde hoeveelheid van het poeder in een kolf van bepaalde grootte veroorzaakt wordt, en *b*: men kan het aantal mg stof bepalen, dat nog juist voldoende is om explosie te verkrijgen. De onder *a* genoemde drukmeting geschiedt volgens de Amerikaansche standaardmethode met een door Clement en Frazer ontwikkelde

apparatuur (zie fig. 8)²¹⁾. Hierin is a de explosiekolf, b de ontstekingsinrichting (dit is een geharde porceleinen buis, waaromheen 0.23 mm dik platinadraad gewikkeld is; deze draad is op haar beurt weer door platinablik van 0.1 mm dikte omgeven; draad en blik zijn gescheiden door een dun laagje cement); c de maximumdrukmeter, systeem Crosby en

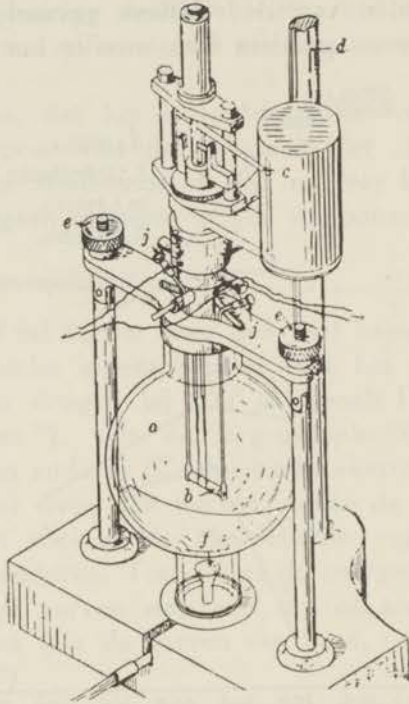


Fig. 8. Explosietoestel volgens Clement en Frazer.

f de kleine ruimte, waarin het te onderzoeken stof voor de proef wordt gebracht. De beide tuben der explosiekolf zijn van gummiringen voorzien. Met behulp van de schroeven e wordt de explosiekolf gasdicht op de onderlaag gedrukt. De temperatuur ($\pm 1200^{\circ}$ C.) van de ontstekingsinrichting wordt gemeten met een thermo-element. Bij de meting brengt men in de kleine ruimte f een bepaalde hoeveelheid stof (75 mg).

²¹⁾ Bureau of Mines, Technical Paper 141.

Door een drukstoot met lucht, welke zich in een reservoir onder een druk van 20 cm kwik bevindt, wordt dit poeder verstoven. De maximale druk wordt daarna, indien explosie heeft plaats gevonden, op den Crosby-manometer *c* afgelezen. Het blijkt, dat de volgens deze methode verkregen uitkomsten in goede overeenstemming zijn met de resultaten verkregen bij experimenten op groote schaal.

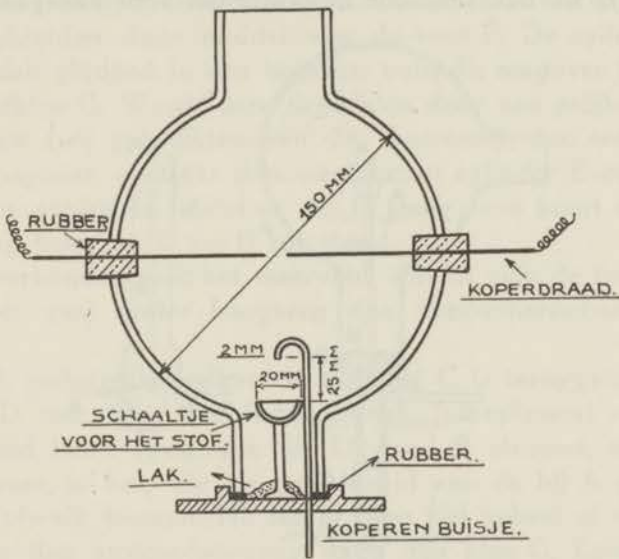


Fig. 9. Stofexplosietoefel volgens Trostel en Frevert.

De onder *b* genoemde explosiegrenzen zouden met ditzelfde apparaat (echter zonder manometer) bepaald kunnen worden; van belang is het dan, om precies vast te stellen, wanneer men, bij het zoeken naar de explosiegrens, een optredend vlamverschijnsel nog een explosie zal noemen en wanneer niet meer. Het apparaat van Clement en Frazer is later door Trostel en Frevert verbeterd²²⁾. Zij gebruikten het apparaat voor het bepalen van explosiegrenzen en deden er geen drukmetingen mede. De veranderingen, welke zij aanbrachten (zie fig. 9), betreffen in hoofdzaak de inrichting voor het ver-

²²⁾ L. J. Trostel und A. W. Frevert, Z. Ver. Deut. Zucker-Ind. **74**, 656 (1924); Chem. Met. Eng. **30**, 141 (1924).

stuiven van het stof. Terwijl bij het toestel van Clement—Frazer de lucht van beneden de kleine holte, waarin het stof ligt, binnentreedt, wordt bij het apparaat van Trostel en Frevert de lucht door een koperen buisje van boven op het met stof bedekte tafeltje geblazen. Behalve met de gloeiende platinaspiraal (1200° C.), ontstaken zij de stofwolk ook met inductievonken (6.5 V.; 3 Amp.) en met een lichtboog (33 V.; 5 Amp.). In het Leidsche laboratorium voor anorganische en

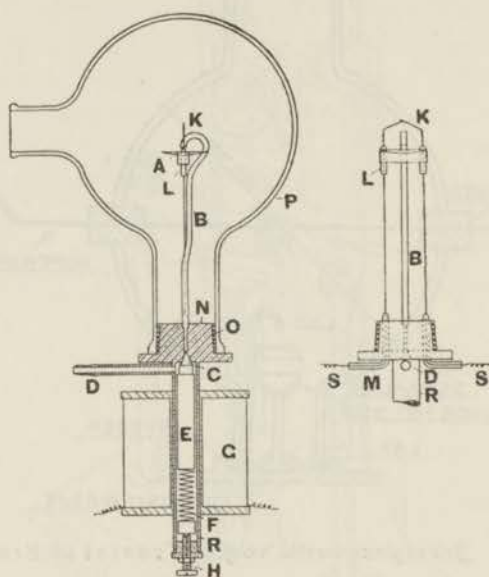


Fig. 10. Stofexplosietoestel in gebruik in het Leidsche laboratorium voor anorganische en physische chemie.

physische chemie is een verbeterd toestel toegepast om explosiegrenzen te bepalen (zie fig. 10). Een groote vooruitgang is het, dat verstuiving zoowel als ontsteking in het centrum der kolf zijn geplaatst. De constructie wijkt verder af door de wijze, waarop de gasstoot wordt teweeggebracht. De inrichting tot verstuiving en ontsteking van het stof bestaat uit een koperen tafeltje A, diameter 2 cm, waarboven juist in het midden een gebogen koperen buisje B, 3 mm wijd, eindigt, op 6 mm afstand van het schaalte. Het schaalte A is aan B gesoldeerd

en wordt er door gedragen. Onder aan is B gesoldeerd in het blok N. Door dit blok loopt een kanaaltje, dat in een conische ruimte uitmondt (C), welke met het zijbuisje D in verbinding staat.

In normalen toestand is er geen verbinding tusschen D en B, doordat zich in de ruimte C een eveneens conische afsluiter bevindt. Deze conische afsluiter is het bovenste gedeelte van een weekijzeren cilindrische staaf E. De afsluiter wordt op zijn plaats gehouden door middel van de veer F. De cylinder E bevindt zich glijdend in een koperen buis, die omgeven is door een draadklos G. Wordt deze draadklos door een gelijkstroom doorloopen (wij gebruikten een 24 V-stroom), dan werkt hij als een magneet, en trekt den weekijzeren cylinder E en daarmee den conischen afsluiter uit C terug; zoo komt dan de verbinding tusschen D en B tot stand.

D is verbonden met het reservoir, waarin zich de lucht (of een ander gas) onder hooger en dan atmosferischen druk bevindt.

De tijd, gedurende welken de afsluiter C is teruggetrokken, en dus D met B in verbinding staat, is beslissend voor de hoeveelheid lucht (gas), die uit D door B stroomt, en deze laatste weer is het, die de gesteldheid van de bij A veroorzaakte stofwolk bepaalt. Nu hangt deze tijd geheel af van den duur van den stroomdoorgang door den klos G. Zoodra de stroom doorgaat, wordt C weggetrokken; zoodra hij wordt afgebroken, wordt C door de veer F teruggeduwd. Zorgt men er dus voor, dat bij verschillende waarnemingen de tijd van stroomdoorgang gelijk is, dan is in verband met het bovenstaande te verwachten, dat bij gelijke hoeveelheden stof op het schaalte A ook eenzelfde stofwolk zal ontstaan.

Het sluiten van den electricischen stroom in den draadklos G kan geschieden door middel van een Morse-sleutel. Is deze neergedrukt, dan is de stroomkring gesloten, en wordt dus de weekijzeren kern in den klos getrokken. Terwijl bij de Amerikaanse en andere toestellen het stof werd verstoven door een luchtstoot, verkregen door een kraan open te draaien of open te drukken, was bij ons toestel het even aantikken van den telegraafsleutel voldoende. Wanneer dit steeds op dezelfde

wijze gebeurt, moet steeds evenveel gas uit het drukapparaat ontwijken, m.a.w. de druk daarin zal steeds met hetzelfde bedrag afnemen. Door dus na elke proef op den manometer waar te nemen, met welk bedrag de druk in het reservoir was afgenomen, kon gemakkelijk worden gecontroleerd, of de tijd van stroomsluiting, dus de uitvoering van de proef, in orde was geweest. Het zal duidelijk zijn, welke voordeelen dit geeft. Zie voor reproduceerbare sluiting van den stroomkring blz. 94.

Met het zoo juist besproken Leidsche toestel is, hoewel het er buitengewoon goed voor geschikt is, nog niet de optredende druk bij stofexplosies gemeten.

De druk, welken men volgens de onder *a* genoemde methode meet, zal afhankelijk zijn :

1^o. van het aantal moleculen gas, dat bij verbranding per molecuul explosief poeder ontstaat en

2^o. van de optredende verbrandingstemperatuur, welke weer in eerste instantie beheerscht wordt door de verbrandingswarmte.

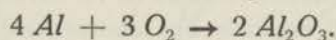
Het aantal mg, dat men volgens de onder *b* genoemde methode vindt, zal *alleen* afhankelijk zijn van de optredende verbrandingstemperatuur. Is deze nl. hoog, dan zal de dichtheid der stofwolk minder groot behoeven te zijn om toch nog reactievoortplanting mogelijk te maken; is ze laag dan is het omgekeerde het geval en is er dus meer stof noodig.

Het verschil tusschen de twee bepalingsmethoden is dus, dat bij de ééne het aantal moleculen gas per molecuul brandbaar stof wel van invloed is op de resultaten, bij de andere methode echter niet. Wanneer we dus de door drukmeting bepaalde relatieve explosiviteit van een serie poeders vergelijken met de explosiviteit van dezelfde poeders, bepaald door meting van de explosiegrens, zullen we een afwijkend verloop van de twee explosiviteitsreeksen mogen verwachten; geen of weinig gas leverende poeders zullen zich duidelijk onderscheiden van degene, welke wel een gasontwikkeling vertoonen. Trostel en Frevert hebben nu metingen gedaan, waarbij zij van een serie poeders zoowel de explosiegrens als de drukken, welke bij de verschillende explosies optraden, bepaalden. In tabel VIII zien we over welke stoffen het onderzoek liep. Van deze stoffen

TABEL VIII.

Soort van stof	mg noodig om een druk van 5 pond/duim ² te ontwikkelen	explosiegrens
Poeder van maisstijfsel	19 mg/1.47 l	10 mg
Aluminium	31 "	10 "
Pittsburgh-standaardkool	44 "	10 "
Mais-elevatorstof	17.8 "	7 "
Tarwe-elevatorstof	24 "	7 "
Zwavel	31 "	7 "
Saccharose	25 "	3 "

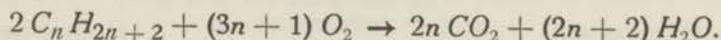
neemt *aluminium* bij zijn verbranding zuurstof op zonder er eenig gasvormig product voor in de plaats te geven.



Na de explosie zullen we dus, wanneer zij in een afgesloten ruimte heeft plaatsgevonden, na afkoeling een contractie vinden.

Zwavel neemt per atoom 1 molecuul zuurstof op onder vorming van zwaveldioxyde. Het aantal moleculen gas verandert dus niet.

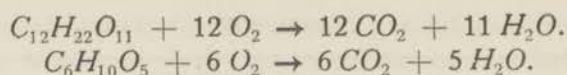
Van *steenkolstof* geeft de koolstof zelf bij verbranding evenveel moleculen kooldioxyde als er moleculen zuurstof voor de verbranding noodig zijn; de koolwaterstoffen (hier 35%) geven een aantal moleculen kooldioxyde en waterdamp, samen bijna 1½ maal zoo groot als de voor verbranding noodige hoeveelheid zuurstof.



Na de explosie zullen we dus een kleine drukstijging vinden. Deze zal door het aschgehalte nog verlaagd worden.

Saccharose heeft per molecuul, voor de verbranding van de koolstof, 12 moleculen zuurstof noodig, welke in evenveel moleculen kooldioxyde omgezet worden. Bovendien ontwikkelen zich nog 11 moleculen waterdamp per molecuul suiker.

Bij maisstijfsel en mais- en tarwe-elevatorstof vormen zich op dezelfde wijze per molecuul brandbaar stof vijf moleculen waterdamp.



Bij de koolhydraten treedt dus een grootere drukstijging op.

Naarmate een poeder nu minder gas ontwikkelt bij de explosie, zal er meer van noodig zijn om een bepaalden druk te veroorzaken. In een groep van poeders met eenzelfde explosiegrens zal dus steeds van het poeder, dat het minste gas ontwikkelt, de grootste hoeveelheid noodig zijn, om een bepaalden druk te veroorzaken. De getallen in kolom 2 van tabel VIII geven nu aan hoeveel mg van het desbetreffende poeder noodig is om bij explosie een druk van 5 pond per duim² (willekeurig uit de waarnemingen van Trostel en Frevert gekozen) te doen optreden. In kolom 3 zijn daarnaast ter vergelijking opgenomen de explosiegrenzen der verschillende poeders. Inderdaad blijkt, om eenzelfde druk te veroorzaken, van aluminium, zwavel en kool bij explosie een aanmerkelijk grootere hoeveelheid noodig te zijn dan van de koolhydraten met gelijke explosiegrens (zie tabel). De ontwikkelde druk is dus bij deze drie stoffen geringer dan bij de koolhydraten.

Tot analoge resultaten komt men, als men de explosiegrenzen vergelijkt met het aantal mg van de poeders, noodig om een willekeurig hooger en of lageren druk te veroorzaken. Ik heb daarvoor uit de waarnemingen van Trostel en Frevert respectievelijk gekozen 8.7 en 2.1 pond per duim². De getallen, welke men dan verkrijgt (zie tabel IX), heb ik voor kool,

TABEL IX.

Soort van stof	mg noodig om een druk te ontwikkelen van:		explosiegrens
	8.7 pond/duim ²	2.1 pond/duim ²	
Poeder van maisstijfsel.	36.5 mg/1.47 l	17 mg/1.47 l	10 mg
Aluminium	50 " "	14 " "	10 "
Pittsburgh-standaardkool	75 " "	22.5 " "	10 "
Mais-elevatorstof	49 " "	13 " "	7 "
Tarwe-elevatorstof	50 " "	15 " "	7 "
Zwavel	62 " "	14.4 " "	7 "
Saccharose	48 " "	10 " "	3 "

aluminium en maisstijfsel tezamen met de desbetreffende cijfers uit tabel VIII vereenigd in fig. 11. Men ziet, dat de kool- en aluminiumcurven liggen boven de mais-(koolhydraat)curve. Om een bepaalden druk te verkrijgen is dus van kool en aluminium steeds meer noodig dan van mais.

We hebben hier steeds als explosiegrens aangenomen die concentratie, waarbij nog juist een vlam optrad; tot resultaten

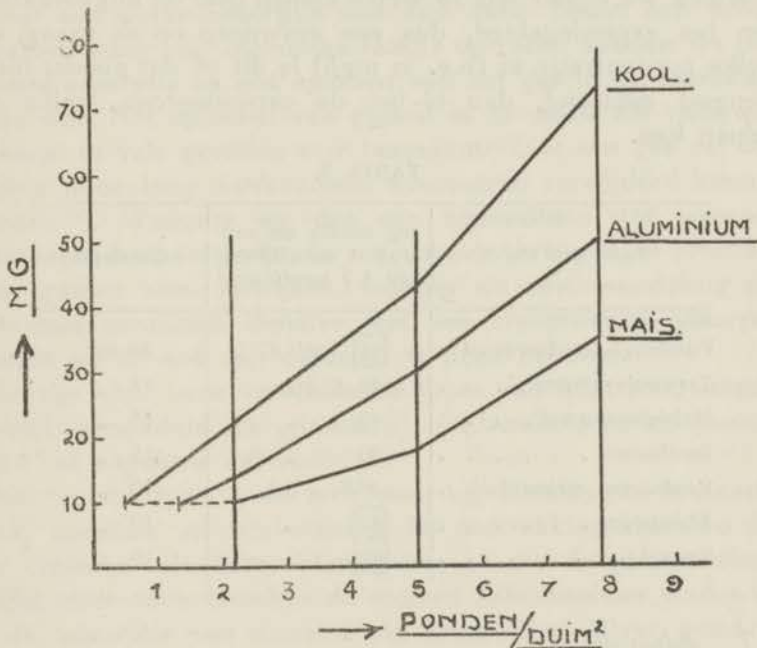


Fig. 11. Aantal mg van eenige stoffen, noodig om bij explosie een bepaalden druk te geven.

gelijk aan de bovenstaande komt men echter, als men niet het al of niet optreden van een vlam als explosiegrens beschouwt, maar het al of niet voortschrijden van de reactie door de gehele kolf (zie tabel X).

Uit de bovenstaande resultaten kunnen we de conclusie trekken, dat, wanneer we een inzicht willen krijgen in de grootere of kleinere *gevaarlijkheid* van verschillende poeders, welke immers bepaald wordt door het ontwikkelen van een

grooteren of kleineren druk, we de *drukken* moeten meten, welke bij de reacties optreden en geen explosiegrenzen bepalen. De poeders met een lage explosiegrens behoeven in het geheel niet de meest gevaarlijke te zijn. Zwavel is hiervan een zeer mooi voorbeeld; het heeft een lage explosiegrens, doch is minder gevaarlijk door het ontbreken van een toeneming van de hoeveelheid gas.

Willen we echter iets te weten komen over de uitgebreidheid van het explosiegebied, dus een antwoord op de vraag, van welke concentratie af (b.v. in mg/l) is dit of dat poeder-luchtmengsel explosief, dan is het de explosiegrens, welke ons helpen kan.

TABEL X.

Soort van stof	mg noodig om een druk te ontwikkelen van 8.7 pond/duim ²	explosiegrens
Pittsburgh-standaardkool .	75 mg/1.47 l	30 mg
Tarwe-elevatorstof	48 " "	15 "
Mais-elevatorstof	49 " "	15 "
Saccharose	50 " "	15 "
Poeder van maisstijfsel. .	36.5 " "	10 "
Aluminium	50 " "	10 "
Zwavel	62 " "	10 "

§ 7. Adsorptie.

Op verschillende plaatsen in de literatuur wordt de aandacht gevestigd op de groote hoeveelheden gas, welke poedervormige stoffen, zooals kool, suiker, enz., in staat zijn te absorbeeren. In deze ad- en absorptie meent men een der oorzaken te zien van de groote explosiviteit der fijnverdeelde brandbare stoffen ²³⁾.

In dat geval zouden de geadsorbeerde hoeveelheden gas een behoorlijk deel moeten zijn van de hoeveelheden, noodig om de betreffende hoeveelheid stof geheel te verbranden. Deze vraag heb ik nader onderzocht.

²³⁾ Beyersdorfer, Staubexplosionen, p. 18.

De starheid der vaste stoffen maakt het mogelijk, dat een betrekkelijk kleine hoeveelheid stof een zeer groote oppervlakte verkrijgt, welke zich onveranderd handhaaft.

Een kubusje van één of andere stof met een inhoud van 1 cm^3 (oppervlakte 6 cm^2) verkrijgt bij verdeling in kubusjes van 30μ (de gemiddelde grootte der zeer explosieve poeders) een oppervlakte van 1994.2 cm^2 , dat is een ruim 300-voudige oppervlaktevergroting. Deze groote oppervlakteontwikkeling brengt een sterke adsorptie met zich mee. Naast een aantal gevallen, waar een *chemische reactie* optreedt, kennen we ook *zuivere adsorptie* en een *oplossen* van het gas in de massa der vaste stof. Het oplossen van gassen in de massa der vaste stof verloopt in vele gevallen zeer langzaam. Zulk een gas zal ook slechts door lang aanhoudend evacueeren verwijderd kunnen worden²⁴). Wanneer we dus een hoeveelheid stof, waaraan gassen geadsorbeerd zijn, in een vacuum brengen en practisch geen gassen zien ontwijken, moeten we heel voorzichtig zijn met onze conclusie. Behalve met een irreversiebele adsorptie kunnen we nl. ook met oplossen te doen hebben.

Er zijn dus twee verschillende types van adsorptie, respectievelijk aangeduid als „primaire” of *chemische* en als „secundaire” of *physische adsorptie*²⁵).

Het eerste type treft men aan bij metalen en is meestal sterk, specifiek en irreversiebel. De aantrekkingskrachten zijn hier typische valentiekrachten, geknoopt aan de gemeenschappelijke electronen tusschen de atomen. Voorbeelden vinden we in de adsorptie van zuurstof aan koper, ijzer, zilver, goud en platina en van waterstof aan platina en palladium. Bij lagere temperatuur vinden we bij metalen ook physische adsorptie.

Het tweede adsorptietype (secundaire adsorptietype) treft men aan bij kool (bij lage temperatuur), kiezelzuur, glas, het silicaat chabasiet, mica enz., de zoogenaamde inerte adsorbentia. We hebben hier te doen met van der Waalsche krachten, die van de wederzijdsche polariseerbaarheid der moleculen afhangen. Deze krachten hebben een veel grooter bereik dan alle andere

²⁴) Steacie, J. Phys. Chem. **35**, 2112 (1931).

²⁵) A. F. Benton, J. Am. Chem. Soc. **45**, 887 (1923).

in aanmerking komende krachten. De adsorptie is hier niet specifiek en veel minder sterk. Er zijn indicaties, die er op wijzen, dat bij dit adsorptietype, in tegenstelling met de primaire adsorptie, in bepaalde omstandigheden vele lagen van moleculen gebonden worden. Men kan dan aannemen, dat de zuurstofmoleculen of atomen, welke direct aan het oppervlak gebonden zijn, gepolariseerd worden tengevolge van het verplaatsen van de elektrische ladingen van het molecuul door het elektrische veld van de moleculen van het adsorbens en omgekeerd, zoodat de eerste laag een adsorberend oppervlak vormt voor een tweede laag, enz.²⁶⁾ De polarisatie is natuurlijk in de tweede laag geringer enz.

Uit de voor verschillende gassen aan verschillende secundaire adsorbentia opgenomen curven blijkt de verhouding, waarin de verschillende gassen geadsorbeerd worden, dezelfde te blijven, welk adsorbens men ook neemt. Ammoniakgas wordt steeds het sterkst, waterstof het zwakst gebonden. De geadsorbeerde hoeveelheden zijn, op kleine afwijkingen na, evenredig met de kritische temperatuur en het kookpunt van de betreffende gassen. Deze kleine afwijkingen vallen weg wanneer men de geadsorbeerde hoeveelheden vergelijkt met de dampdrukken bij een bepaalde temperatuur²⁷⁾.

Bij deze secundaire adsorptie zijn de smeltpunten (kookpunten) van adsorbens en geadsorbeerde stof een maat voor de krachten waarover het gaat. Kool heeft een hooger smeltpunt dan een der andere adsorbentia en adsorbeert dienovereenkomstig ook het beste van alle. Bij ferrioxijde, cuprioxijde en vanadiumpentoxijde blijkt inderdaad het adsorberend vermogen af te nemen met dalend smeltpunt. Het feit, dat de edele gassen aan secundaire adsorbentia bijna even sterk geadsorbeerd worden als meeratomige gassen van hetzelfde kookpunt (argon wordt even sterk geadsorbeerd als zuurstof en stikstof) is een goede illustratie van den bovengenoemden regel, dat de mate van adsorptie ook beheerscht wordt door het kookpunt van de *geadsorbeerde* stof.

²⁶⁾ F. G. Keyes and M. J. Marshall, J. Am. Chem. Soc. **49**, 156 (1927); I. Langmuir, Z. angew. Chem. **46**, 719 (1933).

²⁷⁾ H. Remy, Z. angew. Chem. **46**, 401 (1933).

Karakteristiek voor de adsorptie-isothermen is, dat zij bij kleine waarden der variabelen lineair verlopen, omdat de verdichting nog gering is en dus nog de ideale gaswetten gelden, om bij hogere waarden om te buigen en een grenswaarde te naderen ²⁸⁾. Bij gladde oppervlakken werd deze verzadiging reeds waargenomen, als het oppervlak lang nog niet volledig met geadsorbeerde moleculen bedekt was. Dit voert tot de voorstelling, dat in eerste instantie slechts van bepaalde punten de adsorptiekrachten uitgaan. Eucken ²⁸⁾ denkt, dat zich bij hogere temperatuur alleen moleculen bij de krachtmaxima verzamelen en dat bij lagere temperatuur het oppervlak zich meer algemeen bedekt.

Het adsorptietype, dat tusschen een bepaald gas en een bepaalde stof optreedt, is mede door de temperatuur bepaald. Bij lagere temperatuur kunnen b.v. van der Waalsche krachten de adsorptie veroorzaken, terwijl bij hogere temperatuur een chemische reactie optreedt en de moleculen door typische valentiekrachten bindt (de gassen, welke kool afgeeft na adsorptie bij 18° C. bestaan uit zuurstof plus een spoor koolzuur, geen koolmonoxyde (van der Waalsche adsorptie); bij 150° C. bestaan zij uit 5% zuurstof, 95% kooldioxyde, iets koolmonoxyde (valentiebinding); bij 200° C. uit 9% zuurstof, 82% kooldioxyde en 9% koolmonoxyde ²⁹⁾).

Alle stoffen, waarover mijn onderzoekingen loopen, uitgezonderd aluminium, behooren tot het secundaire adsorptietype. Met de meeste van hen zijn nog geen adsorptiemetingen verricht. Een uitzondering hierop vormt kool, waarmede zeer uitgebreide onderzoekingen zijn gedaan; ook van suiker zijn enkele waarnemingen bekend. Bovendien zijn er nog vele metingen verricht met stoffen, die wel tot dit adsorptietype behooren, doch niet tot de stoffen over welke mijn explosiviteitsonderzoekingen loopen. Ze kunnen ons echter tezamen met de onderzoekingen aan kool een inzicht geven in de grootte van de physische adsorptie en daardoor tevens een antwoord geven op de vraag: „is de adsorptie (van lucht) groot genoeg om

²⁸⁾ A. Eucken, Z. Elektrochem. **28**, 6 (1922).

²⁹⁾ D. Mckie, J. Chem. Soc. 1928, 2870.

op de explosiviteit der verschillende brandbare poeders aanmerkelijken invloed uit te oefenen?" Door uit te gaan van de cijfers, welke de geadsorbeerde hoeveelheden *zuurstof* aan de verschillende stoffen weergeven, heb ik de omstandigheden gekozen, welke het gunstigst zijn voor een positieve beantwoording van de vraag (de adsorptie van lucht is nl. steeds geringer dan die van zuurstof). De cijfers, welke de hoeveelheden zuurstof weergeven, welke koolpoeder kan adsorberen, zijn samengevat in tabel XI. De getallen geven aan het aantal cm^3

TABEL XI.

Onderzoeker	Aantal cm^3 O_2 geadsorbeerd aan 1 cm^3 kool
Baerwald	Vlierpittenkool 60 cm^3 } ³⁰⁾
	Kokosnotenkerenkool 16 " }
W. Hempel en G. Vater.	Kokosnotenkool 14.2 " } ³¹⁾
	Bloedkool 25.4 " }
J. Dewar	Kokosnotenkool 18 " ³²⁾

zuurstof, dat geadsorbeerd wordt per cm^3 kool. We zien, dat kool van vlierpitten het sterkste adsorptievermogen bezit, terwijl het adsorptievermogen van kokosnotenkool veel geringer is. Voor het s.g. van kool wordt opgegeven ± 1.2 . Wanneer we deze waarde 1.2 in onze berekeningen gebruiken, blijkt het, dat vlierpittenkool 60 cm^3 zuurstof adsorbeert per cm^3 tegen kokosnotenkool 14.2 cm^3 (in de verhandelingen zelf wordt de adsorptie opgegeven in cm^3 zuurstof per g), dit is respectievelijk 85.2 mg/cm^3 en 20.2 mg/cm^3 . Voor volledige verbranding tot kooldioxyde heeft 1 cm^3 kool 3.19 g zuurstof nodig. De geadsorbeerde hoeveelheden zuurstof zijn echter slechts 2.7% en 6% van dit bedrag. De geadsorbeerde gas-hoeveelheid bedraagt dus in het gunstigste geval slechts twee en een half procent van de hoeveelheid gas, nodig voor verbranding. De overige 97.5% moeten van buiten worden aangevoerd.

³⁰⁾ H. Baerwald, Ann. Physik **23**, 84 (1907).

³¹⁾ W. Hempel und G. Vater, Z. Elektrochem. **18**, 724 (1912).

³²⁾ J. Dewar, Ann. chim. phys. (3) **8**, 5 (1904).

Om het adsorbeerend vermogen bij de andere onderzochte secundaire adsorbentia te kunnen vergelijken met kool, noemen we het adsorbeerend vermogen gelijk aan dat van kool, als per cm^3 van beide stoffen evenveel zuurstof geadsorbeerd wordt. In tabel XII zijn de cijfers, welke betrekking hebben op

TABEL XII.

Onderzoeker	Adsorbeerende stofsoort	Geadsorbeerde hoeveelheden
R. Ruer en J. Kuschmann	CuO	7.90 mg lucht/100 g
	Fe_2O_3	2.63 " " "
	CeO_2	31.30 " " "
	SiO_2	189.30 " " "
E. C. Markham en A. F. Benton	SiO_2	28.03 $\text{cm}^3 \text{O}_2/19.6 \text{ g}$
F. Durau	Glas	0.1617 g/120 g
D. H. Bangham en J. Stafford	Graphiet	8.5 $\text{cm}^3/11 \text{ g}$
O. Schmidt	Chabasiet	34.3 $\text{cm}^3 \text{O}_2/\text{cm}^3$
J. Sameshima en H. Hemmi	Laumontiet	1.02 $\text{cm}^3 \text{O}_2/\text{g}$
	Stilbiet	1.48 " " "
	Mordeniet	9.88 " " "

de andere stoffen, welke een physische adsorptie vertoonen, verenigd.

We zien, dat van de eerste groep kiezelzuur het sterkste adsorbeerend vermogen bezit. Van de groep aan het eind der tabel is chabasiet het krachtigste adsorbens. De eerste waarde, welke voor kiezelzuur opgegeven wordt, is 189.3 mg/100 g. Deze waarde heeft betrekking op lucht. Het s.g. van kiezelzuur is 2.5. De aan dit kiezelzuur geadsorbeerde hoeveelheid lucht is dus $4.7 \text{ mg}/\text{cm}^3$. Voor zuurstof zou een iets hogere waarde gevonden zijn. Uit de tweede voor kiezelzuur opgegeven waarde bereken ik, dat hier $3.7 \text{ mg zuurstof}/\text{cm}^3$ wordt gead-

³³⁾ R. Ruer und J. Kuschmann, Z. anorg. Chem. **154**, 69 (1926); **166**, 257 (1927).

³⁴⁾ E. C. Markham and A. F. Benton, J. Am. Chem. Soc. **53**, 497 (1931).

³⁵⁾ F. Durau, Z. Physik **37**, 419 (1926).

³⁶⁾ D. H. Bangham and J. Stafford, J. Chem. Soc. 1925, 1085.

³⁷⁾ O. Schmidt, Z. physik. Chem. **133**, 263 (1928).

³⁸⁾ J. Sameshima and H. Hemmi, Bull. Chem. Soc. Japan **9**, 27 (1934).

sorbeerd. De adsorptie bij kiezelzuur is dus zeer veel minder dan bij kool, zij is slechts een vierde deel van de kleinste waarde, welke we bij kool vonden. Verder vinden we in de tabel nog waarden opgegeven voor de adsorptie aan glas, graphiet en chabasiet.

Wanneer we voor glas een s.g. van 2.25 nemen, vinden we daar aan een adsorptie van 3 mg zuurstof per cm^3 . Graphiet met een s.g. van 2.2 adsorbeert 0.002 mg/cm^3 . Beide zijn dit waarden, welke nog beneden, voor graphiet zelfs zeer ver beneden, die van kiezelzuur liggen. Een adsorptie, welke met die aan kool kan wedijveren, vertoont alleen chabasiet, dat 34.3 cm^3 zuurstof per cm^3 adsorbeert. Bij een s.g. van 2.2 is dit 48.7 mg/cm^3 , een waarde, welke ongeveer gelijk is aan de gemiddelde adsorptiewaarde van kool.

Wanneer we de resultaten van mijn berekeningen beschouwen en zien, dat ze ons leeren, dat in het gunstigste geval slechts 2.7% geadsorbeerd wordt van de hoeveelheid gas, noodig voor volledige verbranding, dan kunnen we ongetwijfeld zonder schroom de conclusie trekken, dat adsorptie geen invloed op de explosiviteit heeft en dit nog te meer, als we bedenken, dat de berekeningen uitgevoerd zijn met de hoogste waarden, die voor de hoeveelheden geadsorbeerd gas worden opgegeven.

§ 8. *Asch- en watergehalte.*

Over den invloed van het aschgehalte op de explosiviteit loopen de meeningen uiteen. Aan den eenen kant zegt men, dat de explosiviteit afneemt, naarmate het aschgehalte grooter is³⁹⁾, terwijl anderen meenen te hebben aangetoond, dat het aschgehalte (b.v. van kool) binnen normale grenzen practisch geen invloed heeft⁴⁰⁾. Men tracht hier een verband te leggen tusschen het aschgehalte en de explosiviteit. In eerste instantie zal het echter de verbrandingswarmte zijn, die verlaagd wordt door een toenemend percentage asch. Het is dan de verbrandingswarmte, welke op haar beurt, naast andere factoren (cohaesie), weer verantwoordelijk is voor de explosiviteit.

³⁹⁾ U. S. Bureau of Mines, Bull. 102, p. 66.

⁴⁰⁾ U. S. Bureau of Mines, Bull. 20, p. 101.

Uit het bovenstaande volgt, dat het door velen gezochte, eenvoudige verband tusschen aschgehalte en explosiviteit niet zal bestaan.

Bij den strijd over den invloed van het aschgehalte heeft men dien van het vochtgehalte steeds buiten beschouwing gelaten. Ook dit zal echter, evenals het aschgehalte, op de verbrandingswarmte van het poeder een nadeeligen invloed uitoefenen ⁴¹⁾. Het ligt daarom veel meer voor de hand een verband te zoeken tusschen het (asch + water)-gehalte en de verbrandingswarmte, dan tusschen het aschgehalte en laatstgenoemde grootheid. Om dit punt nader te onderzoeken, heb ik in tabel XIII ⁴²⁾ de som van asch- en watergehalte van een serie steenkoolsoorten en in tabel XIV ⁴³⁾ dezelfde waarden voor een serie koolhydraten van de formule $(C_6H_{10}O_5)_n$ te-zamen gebracht. Onder deze koolhydraten bevinden zich vele van de poeders, welke ik bij mijn onderzoek betrokken heb. De asch- en watergehalten en verbrandingswarmten in tabel XIII zijn ontleend aan een tabel, waarin deze waarden voor allerlei koolsoorten vereenigd zijn, voorkomende in het „Handbook of Chemistry” van Lange. Het betreft hier kolen uit alle deelen der Vereenigde Staten, maar dan ook alleen uit deze, hetgeen ons de waarborg geeft, dat alle waarden in de tabellen volgens dezelfde methoden (methoden van het „Bureau of Standards”) bepaald zijn, waardoor afwijkende uitkomsten als gevolg van het gebruik van verschillende analysemethoden uitgesloten zijn. De som van de asch- en watergehalten van deze verschillende kolen heb ik uitgezet tegenover de verbrandingswarmten in fig. 12. Eigenlijk is dit niet geheel juist. Het bleek nl. bij het construeeren der curve, dat, indien we van de verschillende kolen de som van eenmaal het aschen eenmaal het watergehalte uitzetten tegenover de verbrandingswarmte, steeds de kolen met een groot watergehalte en klein aschgehalte een lagere verbrandingswarmte hadden dan kolen met een lager watergehalte en een hooger aschgehalte (ver-

⁴¹⁾ U. S. Bureau of Mines, Bull. 20, p. 100.

⁴²⁾ Lange, Handbook of Chemistry, 1934, p. 540—541.

⁴³⁾ Landolt-Börnstein; Chemiker-Kalender, 1927, Band II, p. 661, 662 en Lehrbuch der inneren Medizin, Band II, p. 101.

TABEL XIII. Steenkool.

	$\% H_2O$	$\% \text{ asch}$	$\% \text{ asch}$ + $\frac{5}{4} \times \% H_2O$	verbr.w. in B.t.u./lb. *)
Gunnison	2.7	5.83	9.2	14.099
Bibb	3.21	6.28	10.3	14.140
Jefferson, Ala.	2.4	4.8	7.8	14.620
Fayette	2.8	3.5	7.0	14.650
"	2.87	4.8	8.3	14.521
"	3.3	4.4	8.5	14.500
"	3.3	5.1	9.2	14.209
Alleghany	1.18	7.7	9.2	14.190
Cambria	2.16	5.3	7.9	14.460
"	2.51	6.1	9.2	14.380
Tazewell	3.03	4.5	8.3	14.610
M' Dowell	2.99	6.0	9.7	14.398
Raleigh Pocahontas	2.93	3.1	6.7	14.854
Schuylkil	3.33	9.12	13.2	13.351
Pope	2.07	9.3	11.8	13.702
Sullivan, Pa.	3.40	11.68	16.0	13.102
Shelby	2.31	7.2	10.1	13.650
Hartford	2.91	10.5	14.1	13.270
Cherokee	5.09	8.3	14.6	13.080
Pittsburgh	3.68	5.16	10.2	13.630
Latimer	3.78	7.6	12.3	13.280
Armstrong	3.37	9.7	13.9	13.040
Bedford	1.61	12.1	14.1	13.810
Jefferson, Pa.	2.59	7.9	11.1	13.860
Washington, Pa.	1.96	9.3	11.8	13.622
Wise	2.62	10.0	13.3	13.270
Logan	1.60	6.8	8.8	13.918
Ohio	3.02	8.1	11.9	13.200
Lincoln	3.59	5.5	10.0	13.310
Huntington	3.22	9.0	13.0	13.700
Alleghany	2.22	10.9	13.7	13.430
Somerset	2.36	9.0	11.9	13.740
Grant	3.00	9.3	13.1	13.590
Santa Fe.	7.55	9.32	18.8	12.101
Moose Creek	4.74	8.9	14.8	12.150
Gunnison	4.34	9.3	14.7	12.630
Franklin	7.30	8.05	17.1	12.160
Crawford	3.91	11.8	16.7	12.500
Webster	5.37	9.3	15.9	12.500
Columbiana.	3.51	10.9	15.3	12.730
Jefferson, Ohio	3.42	10.7	15.0	12.720
Allegheny	2.62	13.2	16.7	12.816
Brook.	4.41	8.1	13.6	12.940
Montgomery	1.88	15.2	17.6	12.740
Mineral	2.39	15.6	18.6	12.600

*) 1000 British thermal units/pound = 556 g cal./g.

Vervolg tabel XIII.

Providence	4.50	13.8	19.4	11.620
Williamson	9.41	8.6	20.4	11.860
Green.	13.52	7.3	24.2	11.540
Knox	9.52	10.9	22.8	11.540
Sullivan, Ind.	14.91	6.7	25.3	11.420
Christian, Ky.	9.18	10.7	22.1	11.680
San Juan	6.76	11.9	20.4	11.630
Coal	6.57	11.9	20.1	11.260
Kittitas	10.29	15.9	28.8	11.010
Webb.	4.41	19.0	24.5	11.070
Pulaski	3.80	24.0	28.8	10.960
Washington, Utah	7.02	22.07	30.9	10.480
Christian, Ill.	13.01	10.7	27.0	10.860
Lucas.	15.41	12.6	31.9	10.240
Polk	13.92	14.0	31.4	10.240
Carbon	10.49	11.2	24.3	10.550
Lincoln	20.78	3.2	29.2	10.080
Armstrong	1.78	2.82	30.4	10.460

TABEL XIV. Koolhydraten, enz.

	$\% H_2O$	$\% \text{ asch}$	$\% H_2O$ + $\% \text{ asch}$	$\% H_2O$ + $\% \text{ asch}$ volgens König	gemid- delde	verbr.w. in cal.
Vlas	9.0	1.5	10.5			4290
Hout	10.0	0.5	10.5			4250
Aardappelmeel.	10.5	0.75	11.25			4182
Dextrine	10.5	0.75	11.25			4112
Suikerrietafval	11.0	2.0	13.0			4110
Bamboe	10.5	3.5	14.0			4090
Hout	15.0	0.5	15.5			4050
Hout	13.3	0.5	13.8			3990
	$\% \text{ ver-}$ teerbare stof	$\% \text{ cel-}$ wanden	hieruit berekend $\% \text{ water}$ + $\% \text{ asch}$			
Tarwemeel	80.7	0.6	18.7	13.15	15.9	3500
Maizena	80	1.41	18.6	13.13	15.9	3500
Rijstmeel.	82	0.88	17.1	—	17.1	3500
Havermeel	76.4	1.71	21.9	—	—	3400
Roggemeel	77.7	1.35	20.9	13.75	17.3	3300
Boekweitmeel	78	1.00	21.0	—	—	3300
Sago	80	0.5	19.5	—	—	3300
Boonenmeel.	75	1.78	23.2	13.93	18.6	3300
Griesmeel.	73.6	0.89	25.5	—	—	3300
Erwtenmeel	64	5.57	30.4	14.06	22.2	2800
Linzenmeel	63	3.92	33.1	—	—	2800
Vitzboonen	64	5.0	31.0	—	—	2800

geleken werden natuurlijk steeds kolen met een gelijke som van asch- en watergehalte). Water heeft dus een sterkeren verlagenden invloed op de verbrandingswarmte dan asch. Het bleek, dat deze sterkere invloed was te compenseeren door in

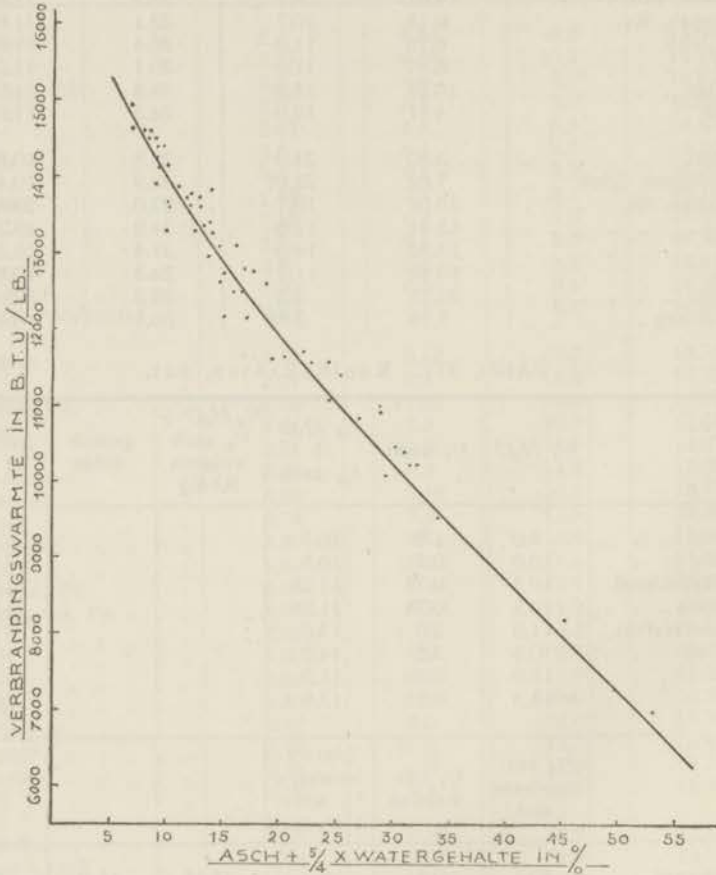


Fig. 12. Verband tusschen verbrandingswarmte en de som van asch en $\frac{5}{4}$ maal het watergehalte bij verscheidene Amerikaansche kolen.

(1000 B.T.U./pound = 556 g cal./g)

plaats van de som van eenmaal asch- plus eenmaal watergehalte uit te zetten tegen de verbrandingswarmte, te nemen eenmaal aschgehalte plus $\frac{5}{4}$ maal watergehalte. Dit is in fig. 12 dan ook gebeurd. Uit deze figuur zien we duidelijk, dat

de verbrandingswarmte regelmatig afneemt bij het toenemen van de som van het asch- en $\frac{5}{4}$ maal het watergehalte.

Wanneer we nu de verschillende punten van de koolcurve in fig. 12 nader beschouwen, dan zien we, dat er nog een zekere, zij het niet groote, spreiding bestaat. Het was nu de vraag of misschien nog andere factoren, zooals het gehalte aan vluchtige stoffen en het gehalte aan niet aan zuurstof gebonden waterstof, een zekeren invloed hadden. Wat den invloed van het gehalte aan vluchtige stoffen betreft, bleek inderdaad dat de kolen met het grootste vluchtigheidsgehalte voor het meerendeel aan de linkerzijde der curve lagen, dus een lagere verbrandingswarmte hadden en dat de kolen met het kleinere vluchtigheidsgehalte voor het meerendeel aan de rechterzijde der curve waren gelegen en een grootere verbrandingswarmte bezaten. Hierop waren echter ook weer vele uitzonderingen; de spreiding tengevolge van experimenteele foutenbronnen blijkt dus van dezelfde orde te zijn als de invloed van het percentage vluchtige stoffen, dat de kool bevat. Het heeft dus geen zin dezen factor mede bij het teekenen der curve in aanmerking te nemen.

Het hier gezegde geldt eveneens voor het niet aan zuurstof gebonden waterstofgehalte (koolwaterstoffen). Ook dit heeft een kleinen invloed op de verbrandingswarmte. Bij de stoffen met een hoog gehalte aan niet aan zuurstof gebonden waterstof blijkt de verbrandingswarmte gemiddeld geringer te zijn dan bij de stoffen met een geringer waterstofgehalte. Ook deze invloed blijkt van dezelfde orde te zijn als de experimenteele spreiding. Hier heeft het dus evenmin zin dezen factor in aanmerking te nemen. Ook door beide factoren tegelijk in aanmerking te nemen, komen we niet tot betere resultaten. De som van asch- en watergehalte blijft dus *de* factor, welke de verbrandingswarmte bepaalt.

In verschillende leerboeken worden formules gegeven voor de berekening van de verbrandingswarmte van een steenkool uit het koolstof-, waterstof- en zuurstofgehalte en het watergehalte ⁴⁴⁾. Zulk een formule ziet er b.v. als volgt uit:

⁴⁴⁾ Chemiker-Kalender, 1927, Band II, p. 469.

$$V = 80.8 \cdot C + 342 (H - \frac{1}{8} O) - 6 \cdot w \text{ k cal./kg} \quad (1)$$

(Bij C , H , O en w in te vullen het percentage koolstof enz. dat de kool bevat). De met deze formule berekende verbrandingswarmten komen vrij behoorlijk met de experimenteel gevonden waarden overeen. Alleen voor hoogere asch- en watergehalten worden de afwijkingen grooter, doch blijven steeds beneden 400 cal. Daar nu uit het in de vorige bladzijden gezegde gebleken is, dat de verbrandingswarmte van een bepaalde steenkool in eerste instantie door de som van asch- en watergehalte bepaald wordt (twee factoren, welke, in tegenstelling met de factoren in bovenstaande formule, zeer eenvoudig, zelfs in het kleinste laboratorium, bepaald kunnen worden), heb ik, met behulp van het waarnemingsmateriaal verzameld in fig. 12, voor de berekening van de verbrandingswarmte van diverse kolen onderstaande eenvoudige empirische formule opgesteld:

$$V = (16 - 0.22 S + 0.001 S^2) 0.556 \text{ k cal./kg}$$

(waarin S de som is van aschgehalte en $1.25 \times$ watergehalte).

De eerste van de drie termen dezer formule geeft de verbrandingswarmte van zuivere kool, terwijl de tweede term de vermindering voorstelt, die deze verbrandingswarmte ondergaat tengevolge van het asch- en watergehalte. Daar het verband tusschen verbrandingswarmte en asch- en watergehalte niet geheel lineair is, werd nog een correctieterm toegevoegd.

Het blijkt, dat de afwijkingen van experimenteële en berekende verbrandingswarmte van dezelfde orde zijn als bij formule (1). Het voordeel van deze formule is dus niet gelegen in de grootere nauwkeurigheid, maar in het gemak, waarmede men de in de formule voorkomende grootheden bepaalt.

De som van de asch- en watergehalten van de verschillende koolhydraten is uitgezet tegen hun verbrandingswarmten in fig. 13. Hier is genomen de som van eenmaal het watergehalte plus eenmaal het aschgehalte, omdat de watergehalten der verschillende koolhydraten onderling zeer weinig verschillen. De curve geldt speciaal voor koolhydraten van de formule $C_6H_{10}O_5$, dus zetmeelen en cellulosen; voor suikers ($C_6H_{12}O_6$) zou wederom een andere curve geconstrueerd moeten worden.

Zoals men uit de curve ziet, is ook bij de koolhydraten de som van asch- en watergehalte de factor, welke de grootte der verbrandingswarmte bepaalt. We hadden hier met de moeilijkheid te kampen, dat verschillende auteurs vrij sterk uiteenlopende waarden voor asch- en watergehalte opgeven. Zoowel de curve verkregen uit de waarnemingen van één auteur⁴³⁾, als de curve verkregen uit die van een anderen⁴³⁾, toonde een regelmatig verloop van het asch- en watergehalte met de verbrandingswarmte. De curve uit fig. 13 is nu getrokken door punten, welke het gemiddelde vormen tusschen de waarnemingen der twee aangehaalde auteurs.

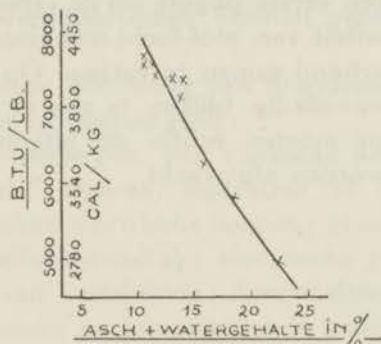
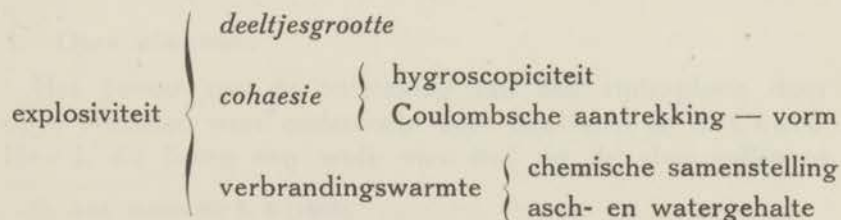


Fig. 13. Verband tusschen verbrandingswarmte en de som van asch- en watergehalte bij koolhydraten van de formule $C_6H_{10}O_5$.
(1000 B.T.U./pound = 556 g cal./g)

§ 9. Het verband tusschen de verschillende factoren.

Wanneer we nu het onderling verband van de verschillende factoren, welke de explosiviteit van stof-luchtmengsels bepalen, nog eens willen overzien, kan dit het beste geschieden door hen in een schema van onderstaanden vorm samen te vatten:



We zien uit dit schema, dat de deeltjesgrootte en de cohaesie en in mindere mate ook de verbrandingswarmte de *primaire factoren* zijn, welke invloed uitoefenen op de explosiviteit.

De cohaesie en de verbrandingswarmte op haar beurt zijn ieder weer afhankelijk van een aantal *secundaire factoren*, welke tezamen deze twee primaire factoren beheerschen.

Bij het beschouwen van dit schema zien we nogmaals zeer duidelijk, dat het absoluut geen zin heeft een verband te zoeken tusschen asch- en watergehalte, chemische samenstelling of Coulombsche aantrekking aan de eene zijde en de explosiviteit aan de andere zijde.

Dit is slechts een eerste poging om de verschillende factoren, welke de explosiviteit van stof-lucht-mengsels beheerschen, in hun onderling verband samen te vatten. Op sommige punten zal dit schema onvolledig blijken te zijn of gewijzigd moeten worden. Daarvoor moeten echter de uitkomsten van nieuwe onderzoekingen worden afgewacht.

HOOFDSTUK III.

Over de oorzaken van stofexplosies.

Een stofexplosie kan in de eerste plaats optreden, wanneer een explosief mengsel van brandbaar stof en lucht in aanraking komt met een warmtebron van voldoende hoge temperatuur. Tot zoodanige warmtebronnen kunnen gerekend worden te behooren:

1^o. *open vlammen*, afkomstig van brandende voorwerpen en brandende gassen of gasmengsels;

2^o. *gloeiende voorwerpen*, van voldoende hoge temperatuur, zooals „brandende” sigaren, sigaretten of pijpen; gloeiende draden van gebroken electriche lampen; gloeiende kooldeeltjes ontstaan door zelfontbranding; electriche geleidingen, smeulend tengevolge van kortsluiting; doorsmeltende „zekeringen”; smeulende drijfriemen en warmlopende maalsteenen.

Ook kan ontsteking langs electriche weg plaats hebben; b.v. door:

3^o. *vonken van verschillenden aard*, o. a. afkomstig van metaalstukjes of steentjes schurende langs metaal of steen, of ontstaan door ontlading van statische electriciteit (electriche ladingen, opgewekt door snel bewegende drijfriemen; wrijvings-electriciteit, opgewekt door het stof zelf, en ladingen aanwezig in de stofwolk als zoodanig).

In de tweede plaats kan een stofexplosie ontstoken worden door de drukgolf van een gasexplosie.

1. *Open vlammen.*

Het gevaar van de ontsteking van een stofexplosie door open vlammen werd onderzocht door Mallard en le Châtelier¹⁾. Zij lieten een wolk van stof op de vlam vallen en

¹⁾ Ann. mines (8) 1, 5 (1882).

namen waar, of al dan niet ontsteking intrad. Zij gebruikten daarbij: 1^o. de vlam van een Davylamp, zonder gaasje; 2^o. dezelfde vlam, opgedraaid tot 5 cm hoogte; 3^o. een groote Bunsenvlam; 4^o. een bal brandend papier. De volumina van deze vlammen nemen toe in de richting van 1 naar 4.

Zij namen nu waar, dat de ontsteking van een stofwolk des te gemakkelijker plaats vond, naarmate het vlamvolumen grooter was en dat de ontsteking dus blijkbaar gebonden is aan een zeker minimum-vlamvolumen. Wanneer het volume van de vlam werd vergroot boven het minimum, verliep de ontsteking gemakkelijker, een verdere vergrooing had geen invloed meer.

Morgan²⁾ kwam tot het besluit, dat de ontbranding meer afhangt van de hoeveelheid warmte, welke in zekeren tijd toegevoerd wordt, dan van de temperatuur van de ontstekingsbron.

Ondanks haar geringe oppervlakte, blijkt de vlam van een lucifer wel degelijk in staat te zijn een stofexplosie te veroorzaken. Zij is de oorzaak geweest van zulk een groot aantal explosies op dit gebied, dat het gevaar ervan buiten twijfel is³⁾.

Een grooter gevaar nog brengt het gebruik van verlichtingsbronnen met open vlam, zooals kaarsen, lantaarns, gaslicht enz. met zich mede, zooals reeds uit de onderzoekingen van Mallard en le Chatelier is af te leiden.

Zoo vermelden Price en Brown⁴⁾ een explosie van zeer grooten omvang in een stijfselabriek, veroorzaakt door de aanwezigheid van een brandende lantaarn bij de reiniging van een droogtrommel. Men zag duidelijk, dat de stofwolk rond de lantaarn vlam vatte, terwijl een fractie van een seconde later de geheele inhoud der droogtrommels in vlam stond.

In steenkolenmijnen zijn de vlammen, naar buiten slaande bij het schieten, vaak de oorzaak geweest van steenkoolstofontploffingen⁵⁾.

Ook een kleine mijngasexplosie is menigmaal de ontsteker van een wolk van steenkoolstof geweest.

²⁾ Trans. Inst. Civ. Eng. **196**, 334 (1913/14); Trans. Inst. Min. Eng. **49**, 220 (1915).

³⁾ Price, Dixie Miller **55**, 31.

⁴⁾ Price and Brown, l. c., p. 69.

⁵⁾ Bureau of Mines, Techn. Paper 464 (1929).

Kleine branden hebben vaak groote stofexplosies ingeleid, wanneer gedeeltelijk verbrande balken bij hun val brandbaar stof opwervelden.

Ook een straal bluschwater kan tot het ontstaan van een stofexplosie aanleiding geven. Price en Brown⁶⁾ vermelden bijv. zoo'n geval bij een brand in een linoleumfabriek, waar een waterstraal in een ruimte, met kurkstof gevuld, werd gericht.

Van de explosies, welke in ons land zijn voorgekomen, tengevolge van het werken met lampen met open vlammen, vermeldt het Centraal Verslag van de Arbeidsinspectie o.a. een stofexplosie in een rijstpellerij tengevolge van het brengen van een onbeschermt licht in de stofkast⁷⁾.

Een dextrinestofexplosie ontstond, doordat een stofwolk van verhit zetmeel in aanraking kwam met een open vlam⁸⁾.

In een ander geval trad een explosie op, toen men met een brandende kaars de stofkamer van een kurkmalerij binnentrad⁹⁾.

2. Gloeiende voorwerpen.

Dat gloeiende voorwerpen tot een stofexplosie aanleiding kunnen geven, is op zeer veel verschillende wijzen bewezen. Gloeiende deeltjes van sigaar, sigaret, of pijp blijken daarvoor voldoende te zijn.

In Nederland is een stofexplosie voorgekomen, tengevolge van het rooken van een sigaret in een stijfselfabriek¹¹⁾.

Vele malen zijn stofwolken ontstoken door den gloeidraad van een brekende lamp¹²⁾. Ook laboratoriumexperimenten zijn op dit gebied verricht¹³⁾.

⁶⁾ Price and Brown, p. 71.

⁷⁾ Centraal Verslag der Arbeidsinspectie 1909, p. 170.

⁸⁾ Ibid. 1913, p. 194.

⁹⁾ Ibid. 1916, p. 180.

¹⁰⁾ Price and Brown, p. 66.

¹¹⁾ Centraal Verslag der Arbeidsinspectie 1927, p. 124.

¹²⁾ Price, Millers' Review, vol. 29, p. 270; Price, Brown and Hylton, U.S. Dep. of Agriculture Circular 171.

¹³⁾ De proeven werden verricht in de laboratoria te Nela Park (Cleveland, Ohio) voor de verschillende fabrieken van electriche gloeilampen in samenwerking met het Bureau of Chemistry door C. L. Dows en H. G. Hills.

De proeven waren als volgt ingericht. Op den bodem van een explosiekamer bevindt zich de fitting, waarin de verschillende lampen kunnen worden geschroefd. Tegenover de lamp wordt een staaf, waaraan een veer is bevestigd, vastgehouden door een pal. Op tafeltjes, aan de wanden aangebracht, bevindt zich stof, dat er door een drukstoot afgeblazen kan worden. Nadat op deze wijze een stofwolk is gevormd, wordt de pal teruggetrokken; de veer ontspant zich en de lamp breekt. Tenzij het aanwezige stof-luchtmengsel niet explosief was, volgde steeds een explosie. Het gebruiken van lampen, zonder een tweede glazen omhulling, kan in fabrieken dus buitengewoon gevaarlijk zijn.

Een tweede glazen omhulling is ook daarom noodzakelijk, omdat gebleken is, dat stof, gedurende eenigen tijd in aanraking met den ballon van een elektrische lamp, tot *zelfontbranding* kan geraken of kan gaan gloeien en zoo een bron van gevaar kan worden ¹⁴⁾.

Proeven leerden, dat de glaswand van elektrische met gas gevulde lampen (van 150 tot 300 Watt) een temperatuur van 140 à 170° C. kan bereiken, terwijl vele stoffen reeds bij die temperatuur ontleed of geoxydeerd worden en ten slotte tot ontbranding kunnen geraken. Bovendien kan het stof, dat op den ballon ligt, de uitstraling van warmte beletten, waardoor de temperatuur van den ballon stijgt tot de ontstekingstemperatuur van het stof. Deze ontstekingstemperaturen zijn voor verschillende stoffen vrij laag; van tabak is zij b.v. 172° C., van courantpapier 185° C., van houtkrullen ongeveer 215° C. en van katoenafval 230° C. ¹⁵⁾. Verder kan worden opgemerkt, dat de brandbaarheid kan toenemen door beginnende ontleding ¹⁶⁾, terwijl de warmte, door autoxydatie ontwikkeld, ook het hare bijdraagt ¹⁷⁾.

¹⁴⁾ H. v. Hettinga Tromp, De Ingenieur, 1927, Nos. 35 en 36; C. R. Brown, The determination of the ignition temperatures of solid materials, diss., The Catholic Univ. of America, 1934; Möhlau, Chem. Ztg. **56**, 582 (1932).

¹⁵⁾ C. R. Brown, diss., p. 66—67; en National Fire Protection Quarterly **28**, 135 (1934); Die Mühle **71**, 32 (1934).

¹⁶⁾ Zie blz. 98.

¹⁷⁾ Zie ¹⁵⁾.

Op dezelfde manier kan ook stof ontbranden, wanneer dit zich in een niet te dunne laag op de lagers van machines bevindt. Zijn de machines in bedrijf, dan wordt het stof voortdurend verwarmd, terwijl de uitstraling der warmte belet wordt. Een lager-temperatuur van 120° C. bleek voldoende te zijn om zelfontbranding te doen optreden ¹⁸⁾.

Op dezelfde wijze, nl. door warmteaccumulatie, kan ook hout en kurk, tegen stoompijpen of ovens bevestigd, na gedeeltelijke ontleding tot zelfontbranding geraken ¹⁹⁾.

P. W. Edwards ²⁰⁾ bericht over een cellulose-explosie, welke veroorzaakt moet zijn door het ontbranden van cellulosestof, dat zich op een pijp had afgezet, die op 178° C. was verhit.

Vindt geen warmteaccumulatie plaats, dan treedt geen zelfontbranding op. Toch kan dergelijk verhit materiaal gevaarlijker worden. Matla en Lindeyer ²¹⁾ verhitten verschillende monsters dextrine in een droogstoof gedurende zeer langen tijd (de meeste tot ruim 1000 uren, een enkele tot 1859 uren) op 125 respectievelijk 140° C. Het bleek, dat alle monsters onder voortdurende gewichtsvermindering eerst een toeneming der explosiviteit te zien gaven, gevolgd na nog langere verhitting door een daling. Het punt van maximale explosiviteit werd bij elk der poeders bereikt na een gewichtsverlies van ongeveer 24% (zie fig. 14). Langdurige verhitting leidt dus niet tot steeds explosievere poeders en, bij uitsluiting van warmteaccumulatie, ook niet tot zelfontbranding; dit laatste treedt alleen op, wanneer de ontwikkelde warmte niet kan uitstralen.

Als aanleiding voor het optreden van stofexplosies kan verder genoemd worden het gloeiend worden van elektrische draden tengevolge van kortsluiting. Ook is er een geval bekend, dat het doorsmelten van een onbeschermd „zekering” een hevige explosie inleidde.

Dat het in brand geraken van drijfriemen, tengevolge van

¹⁸⁾ H. Geck, Die Verhütung von Staubexplosionen, 1931, 56.

¹⁹⁾ E. v. Schwarz, Handb. d. Feuer- u. Explosionsgefahr, III. Aufl., 1922, S. 232; U. S. Dep. Agr., Bur. Chem., Report of conference on spontaneous heating and ignition of agricultural and industrial products, Washington, 1929.

²⁰⁾ Paper Trade Journal 17 Jan. 1924.

²¹⁾ Diss. Matla, p. 85—94.

het slippen, gevaar kan opleveren, ligt voor de hand. Zoo'n geval heeft men waargenomen bij een elevator, waar, tengevolge van een verstopping, de drijfriem, welke den elevator met het drijfwerk verbond, over de elevatorriemschijf ging slippen. Zooveel warmte werd ontwikkeld, dat de riem ging smeulen en branden, en de door den brekenden en vallenden riem gevormde stofwolk ontstak.

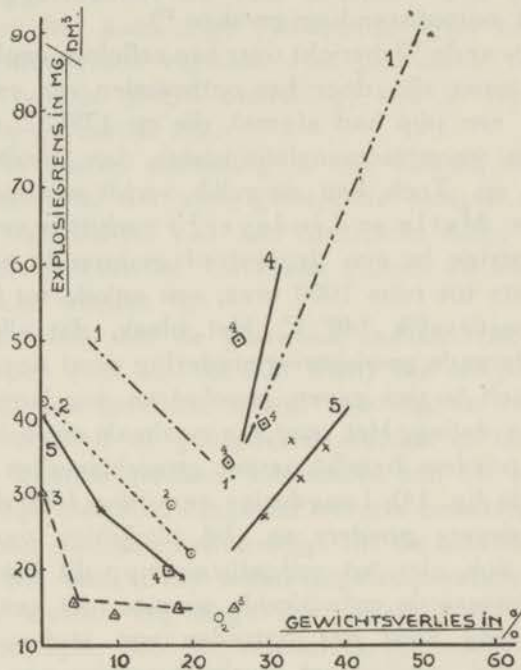


Fig. 14. Verloop der explosiviteit bij droging van dextrine.

Ook worden in de literatuur warmgelopen lagere als directe oorzaak van stofexplosies genoemd. Een onvoldoende smering of een onjuiste afstelling kan van het warmlopen de oorzaak zijn. Wanneer daarbij temperaturen van 250° C. of hooger worden bereikt, kan in de nabijheid zwevend stof van voldoende groote concentratie ontbranden en explodeeren. Bij ongeveer 400° C. gaat bovendien de olie in het lager branden, een tweede groote gevarenbron vormende. De lagere bevinden zich echter

meestal niet binnen de ruimte (trommels enz.), waarin zich gevaarlijke stofconcentraties voordoen, zoodat ontsteking van een stof-lucht-mengsel langs dezen weg hoogst zelden zal voorkomen. Bovendien worden temperaturen van 250° C. in een lager slechts bereikt tengevolge van zeer groote onoplettendheid.

Om dezelfde reden is ook het explosiegevaar van warm-gelooopen walsen zeer gering.

Iets anders is het geval met maalsteenen, die slechte geleiders zijn. De door wrijving opgewekte warmte blijft hier op de wrijfvlakken gelocaliseerd; de temperatuur kan daarom in korten tijd een gevaarlijke hoogte bereiken.

Uit verschillende proeven is gebleken, dat zeer kleine, sterk verhitte deeltjes, die bij verschillende bewerkingen ontstaan, het stof niet ontsteken; hun warmtevoorraad is reeds uitgeput, voordat het stofdeeltje op ontbrandingstemperatuur kan komen²²⁾. Zoo blijkt b.v. een stroom gloeiende deeltjes, gevormd bij het slijpen van metalen voorwerpen op een snel draaienden zandsteen, niet in staat te zijn een meel- of suikerstofwolk tot ontsteking te brengen; de gloeiende deeltjes worden er in gedood²³⁾.

3. Vonken van verschillenden aard.

Hoewel dit door laboratoriumproeven niet is bevestigd²⁴⁾, schijnen toch kleine *stukjes metaal* (schroeven, moeren, spijkers enz.) en kleine *steentjes* in molens, door schuren langs den metaalwand, de walsen enz., hetzij een voldoende hooge temperatuur te kunnen verkrijgen, hetzij voldoende groote *vonken* te kunnen veroorzaken om de aanwezige stofwolken te doen explodeeren.

Bij het malen van eboniet ontstond b.v. een explosie, doordat kleine spijkertjes, in den molen geraakt, vonken vormden, welke het stof ontstaken²⁵⁾.

²²⁾ R. Weber, Verh. Ver. Beförderung Gewerbefleiß 1878, 94.

²³⁾ G. Jaekel und P. Beyersdorfer, Z. Ver. deut. Zucker-Ind. 73, 138 (1923).

²⁴⁾ U. S. Dep. Agriculture Bull. 681; Price and Brown, p. 82.

²⁵⁾ Die Mühle 70, 1366 (1933).

Zoodanige explosies zijn waargenomen in elk type van molen. Hoewel in de meeste moderne molens voorzorgsmaatregelen zijn getroffen voor het verwijderen van vreemde voorwerpen, zooals stukjes metaal, steentjes enz., hetzij door zeven, hetzij door magneten, geraken zulke voorwerpen toch van tijd tot tijd in den molen, waarbij dan tusschen de walsen of door aanraking met de buiswanden, vonken kunnen ontstaan. Een paar voorbeelden, in de literatuur vermeld, mogen dit toelichten.

In een meelfabriek in Michigan geraakte een metalen voorwerp met het graan in de maalinrichting. Toen het voorwerp de walsen had bereikt, vond een hevige explosie plaats.

In een maïsmolen te Milwaukee²⁶⁾ zette zich een stuk ijzer vast in een transportschroef voor reinigingsafval. Door de hier gevormde vonken ontstond een stofexplosie. De daarbij optredende drukstoot deed nieuwe stofwolken ontstaan, die veel heviger ontploften. De geheele fabriek werd verwoest.

Laboratoriumproeven, verricht onder de auspiciën van het Dept. of Agriculture²⁷⁾ in de Vereenigde Staten, hebben echter de mogelijkheid van de ontsteking van stofwolken door vonken, afkomstig van metaaldeeltjes of steen, niet kunnen bevestigen.

Tengevolge van de tot nu toe genoemde oorzaken zijn in de tweede helft der vorige eeuw en het begin van deze eeuw een zeer groot aantal fabrieken het terrein geweest van meer of minder hevige explosies. Thans is het aantal explosies tengevolge van deze oorzaken nog slechts gering. In een modern bedrijf, waar stofwolken kunnen optreden, worden noch open vlammen of lampen, noch brandende pijpen of sigaretten geduld, terwijl ook de bouw van de elektrische geleidingen aan een strenge contrôle is onderworpen. Ook het gevaar, dat ijzeren of steenen voorwerpen in de maalinrichtingen zullen terechtkomen, is sterk afgenomen sinds langs magnetischen weg en door zeven, deze voorwerpen uit het maalgoed verwijderd worden.

Terwijl vroeger verbrekiings- en kortsluitingsvonken dikwijls de oorzaak zijn geweest van hevige explosies, is het gevaar hiervoor, door betere installaties, sterk verminderd.

²⁶⁾ Die Mühle 62, 1324 (1925).

²⁷⁾ Dept. of Agriculture Bull. 681.

De in den laatsten tijd voorgekomen stofexplosies (alleen in de eerste helft van 1934 vonden in de Vereenigde Staten nog 7 zeer groote explosies plaats ²⁸⁾) moeten dan ook aan andere oorzaken worden toegeschreven. De oorzaak van het overgroote deel der explosies, welke nu nog in met stof gevulde ruimten voorkomen, moet gezocht worden in ontladingen van statische electriciteit ²⁹⁾.

Tot voor weinige jaren werd aan deze oorzaak geen aandacht geschonken, omdat men niet geloofde, dat deze ontladingen aanleiding konden zijn tot stofexplosies. Men meende, dat de vonken te koud zijn om het stof te ontsteken. Het is echter gebleken, dat sommige vonken daartoe wel degelijk in staat waren.

Een van de in fabrieken meest bekende oorzaken van het optreden van electricische vonken is de „*riemenelectriciteit*” ³⁰⁾ Vonken van 1½ cm zijn hierbij geen zeldzaamheid. De aanwezigheid van deze statische electriciteit is dikwijls waar te nemen op de plaats, waar de drijfriemen de riemschijven verlaten.

Door wrijving op de schijf en met de lucht ontstaat een kleine lading. Wanneer nu de riem de schijf verlaat, neemt plotseling de capaciteit van den condensator schijf-riem sterk af; daar er een zekere arbeid verricht moet worden om den riem van de schijf te verwijderen, zal de electricische energie van het systeem echter toenemen, zoodat de spanning, zoowel als gevolg van het afnemen der capaciteit, als tengevolge van het toenemen der electricische energie, sterk oploopt; ten slotte zal een gedeeltelijke ontlading optreden (een minder strakke riem geeft grootere ladingen dan een welke meer gespannen is, zie tabel XV ³¹⁾). Vaak neemt men bij de riemschijf geen vonk-ontladingen, doch een corona-effect waar.

²⁸⁾ Price, Brown, Edwards and Hanson, Lessons from some recent dust explosions, National Fire Protection Association, Quarterly October 1934.

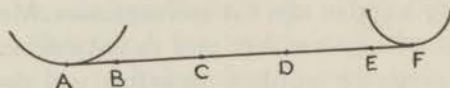
²⁹⁾ Zie Price and Brown, p. 235; Van Valkenburg, Am. Miller **33**, 156; Ind. Eng. Chem. **7**, 1083; Am. Thresherman and Farm Power **20**, No. 2, 5; Price, Electrical Review **78**, 179.

³⁰⁾ H. Stockmeier, Beilage Ber. Bayr. Gewerbemuseums 1904, S. 5; Bunte u. Eitner, Allg. Brauer- u. Hopfenztg. 1907, No. 237

³¹⁾ M. M. Richter, Chem. Ztg. **30**, 324 (1906); **31**, 1255 (1907); **32**, 136 (1908).

TABEL XV.

Conditie van den riem	Spanning op de punten in Volts					
	A	B	C	D	E	F
Los	0	24.800	27.600	28.200	18.800	0
Half gespannen	0	20.800	24.800	24.800	17.200	0
Gespannen . .	0	16.600	17.400	18.000	16.200	0



Schema van riem en riemschijven.

Metingen met een electrometer verricht op verschillende plaatsen van den riem leerden, dat het voltage op het riemdeel, dat op de schijven ligt, gelijk is aan nul. De hoogste spanning op den riem vindt men juist midden tusschen de schijven, spanningen tot 5000 Volt zijn geen zeldzaamheid. Bij een transportband werd waargenomen, dat bij overbelasting vonken van 15 cm lengte met luiden knal van den drijfriem oversprongen op het beschermende traliewerk, dat er omheen was gebouwd. Wanneer men voorwerpen in de buurt brengt van de sterk geladen drijfriemen, nemen zij door inductie aan de zijde van den riem een lading aan, tegengesteld aan deze. Aan het andere einde der voorwerpen vertoonen zij dan een lading gelijk aan die van den riem. Bevindt zich dat eind nu b.v. dicht bij een geaard voorwerp, dan zou een ontlading kunnen optreden van het niet geaarde op het geaarde voorwerp. Zoo kan op een plaats, ver van den electriciteitopwekkenden drijfriem, een explosie worden ingeleid.

Dat niet alleen bij groote lichamen, zooals riemen en riemschijven, bij wrijving oplading optreedt, maar dat ook kleine stofdeeltjes, welke langs een metalen voorwerp strijken, daartoe aanleiding kunnen geven, is o.a. door Rudge³²⁾ aangetoond. Hij heeft op zeer overtuigende wijze bewezen, dat zelfs

³²⁾ W. A. D. Budge, On the electrification associated with dust-clouds, Phil. Mag. (6) **23**, 852; (6) **25**, 481.

het opwervelen van een kleine stofwolk statische electriciteit doet ontstaan. Wanneer een kleine hoeveelheid stof, b.v. meel, op de plaat van een electroscoop werd gelegd en daarna plotseling weggeblazen, bleek de electroscoop geladen te zijn. Dit geldt voor alle fijnverdeelde stoffen, zoowel voor het stof door wind of auto opgewaaid op den weg, als voor het meel in de fabrieken. Lucht en voorwerpen waar langs het stof wrijft, krijgen een lading tegengesteld aan die van het stof zelf.³³⁾ Door stof via een pijp tegen een geïsoleerd koperen gaasje te blazen, kon Rudge het teeken der lading nagaan. Het bleek, dat dit teeken afhing van de chemische constitutie van het materiaal van het deeltje. De optredende lading is tegengesteld aan die van het ion der zelfde stof in oplossing; basische oxyden vertoonen een negatieve lading, zure een positieve.

In de volgende tabel is het teeken der ladingen opgenomen van eenige stoffen, die ook ik bij mijn proeven heb gebruikt:

TABEL XVI.

Kool.	+
Zwavel	+
Aluminium	-
Dextrine	-
Stijfsel	+
Bloem	-
Lycopodium	-

Het droge poedervormige product, dat zich langs de metalen wanden van pijpen, maalinrichtingen, droogtrommels, elevators enz. beweegt, zal de machinedeelen, waarlangs het strijkt, kunnen opladen. Wanneer de electriciteit dan niet op een of andere wijze kan wegvloeien (wanneer het toestel niet geaard is), zal de spanning steeds toenemen, omdat steeds nieuwe stofdeeltjes langs de wanden wrijven. Dit zal zoo doorgaan, totdat de lading zoo hoog is, dat de afstand tot het meest

³³⁾ K. Kähler, Elektrizität d. Gewitter. Gebr. Bornträger, Berlin, 1924, blz. 99; E. Sapper, Meteorolog. Z. **22**, 139 (1905); W. Knoche, Meteorolog. Z. **32**, 555 (1915); S. D. Flora, Monthly Weather Rev. **41**, 416, 894 (1913); Meteorolog. Z. **20**, 189 (1903); P. Beyersdorfer u. F. Kerschler, ibid. **39**, 395 (1922).

nabijgelegen gearde machinedeel overbrugd kan worden en ontlading plaats vindt. Een dergelijke oplading kan echter slechts plaats vinden indien de geleider geïsoleerd is. Een goede aarding van alle onderdeelen van een apparaat bleek steeds voldoende te zijn om ontsteking langs electrostatischen weg te voorkomen. Toestellen, waarin voortdurend explosies door electrostatische ontsteking voorkwamen, bleken na aarding volkomen hiertegen beveiligd te zijn.

Dikwijls is bij deze aarding echter de groote weerstand van dunne oliëfilmpjes over het hoofd gezien. Niet-gearde machinedeelen, welke slechts via kogellagers met de wel gearde deelen verbonden zijn, zijn niet voldoende beveiligd. Verscheidene malen zijn dan ook explosies met electrostatische ontsteking het gevolg geweest van de isolatie van het toestel in pas geoliede lagers ³⁴⁾.

Eerst indien ook de machinedeelen, welke slechts via kogellagers met de aarde verbonden zijn, door sleepcontacten worden geaard, is men volkomen zeker, dat geen explosies door electrostatische ontsteking zullen optreden. De aarding moet echter zeer zorgvuldig geschieden; het verdient aanbeveling tenminste twee aardverbindingen te maken, opdat het defect geraken van één ervan nog niet tot ongelukken aanleiding kan geven.

Het is ook mogelijk statische electriciteit te neutraliseeren, zoo snel als zij is opgewekt, door gebruik te maken van een hoogfrequenten electrischen stroom, welke op de juiste wijze aangebracht elke opgewekte lading zal neutraliseeren.

Naast de zoo juist beschreven ontsteking door een ontlading van electriciteit, ontstaan door het wrijven van stof langs metalen machinedeelen, moet de mogelijkheid onder het oog worden gezien, dat een stofwolk ontstoken wordt door een ontlading, spontaan in de stofwolk optredend op de wijze zooals dat bij een onweder geschiedt. De ontlading zou dan tusschen de wolk en den geaarden metalen wand kunnen plaatsvinden.

Deze wijze van ontsteking behoeft stellig niet aangenomen te worden, daar aarding van het apparaat deze oorzaak niet zou kunnen wegnemen en de explosies, ook na volledige aarding,

³⁴⁾ Zie blz. 88.

nog zouden moeten optreden. Dit is echter nooit gevonden.

De oorzaak van de vele explosies, die in de aluminiumbrons-industrie in de polijstmolens optreden, is volgens Richter³⁵⁾ te zoeken in de electrostatische ladingen, die in deze molens voorkomen. Door de wrijving van de in deze molens toegepaste varkensharen borstels tegen den ijzeren buitenwand ontstaan sterke opladingen³⁶⁾; zoodra ijzer en borstels uit elkaar gaan, hetgeen boven bij het deksel geschiedt, kunnen door de potentiaalverhooging ontladingsvonken optreden, die, zoodra de stofconcentratie een bepaalde waarde heeft bereikt, een explosie kunnen inleiden. Zelfs onder ongunstige weersomstandigheden konden hooge electriche ladingen waargenomen worden.

Vele van de stofexplosies, welke in dorschmachines in den loop der jaren zijn opgetreden³⁷⁾, zijn het gevolg van ontladingen van statische electriciteit. Het bleek nl., dat deze explosies bij voorkeur voorkwamen in die streken, waar het graan sterk was verontreinigd met stuifbrand³⁸⁾, en in tijden van groote droogte. Wanneer het graan nu werd gedorscht, werden de korrels met stuifbrand verbrijzeld en sprongen de sporen tevoorschijn, een dichte stofwolk vormend. In de zeer droge atmosfeer werden terzelfdertijd groote hoeveelheden statische electriciteit opgewekt en verzameld op verschillende machinedeelen, hetzij door het slippen van den drijfriem over de riemschijf of tengevolge van de wrijving van graan, stroo of stof tegen de metalen deelen der machine. Dat deze laatste oorzaak ook het hare bijdroeg tot de oplading, blijkt uit het feit, dat, wanneer afwisselend zuiver en stuifbrand-bevattend graan werd gedorscht, de electrostatische ladingen op de verschillende deelen der machine telkens aanmerkelijk toenamen, bij het dorschen van brandhoudend graan. Metingen, gedaan terwijl de machine in bedrijf was, leerden dat electriche ladingen op alle deelen der machine waren aan te toonen; onder geschikte voorwaar-

³⁵⁾ M. M. Richter, Chem. Ztg. 1906, S. 324, 1908, S. 136.

³⁶⁾ Phil. Mag. 7, 852 (1912).

³⁷⁾ U. S. A. Dept. of Agriculture Circular No. 98 (1920); Dust explosions and fires in grain separators in the pacific Northwest, Dept. Agricult. Bull. No. 379.

³⁸⁾ *Tilletia tritici*.

den waren de voltages zeer hoog. Bij droog weer werden ladingen tot 50000 Volt waargenomen³⁹⁾.

Andere apparaten, welke vele malen⁴⁰⁾ aanleiding hebben gegeven tot explosies, zijn de machines voor het ontpitten van katoen. Ook hier nam men op verschillende geïsoleerde deelen der machine zeer hoge ladingen waar. Het katoen en een in de buis geïsoleerd opgesteld scherm namen een positieve, de andere metalen machinedeelen (pijpen enz.) een negatieve lading aan. Op een klein laboratoriumtoestel, op dezelfde wijze gebouwd, werden ladingen tot 800 Volt waargenomen. Wanneer alle metalen deelen van de machine met elkander en met het scherm verbonden werden, kon de opgewekte lading practisch worden verwaarloosd.

Verder werden hoge ladingen gevonden op stofafzuiginrichtingen. Zulke ladingen werden steeds op bijna alle machinedeelen waargenomen, wanneer sterk met stuifbrand verontreinigd meel werd verwerkt.

Een voorbeeld van een hevige explosie, veroorzaakt door een ontlading van statische electriciteit, is die, welke bij dextrinebereiding in een fabriek in New-Yersey optrad⁴¹⁾. De lagers van een draaienden trommel met zeef waren juist opnieuw gelolied. De electriciteit, welke zich op zeef en trommel verzamelde, tengevolge van het langsschuren der dextrinedeeltjes, kon nu blijkbaar niet meer wegvloeien; een ontlading trad op en een explosie volgde.

Ook de in een breker van katoenpitkoeken voorkomende explosies bleken veroorzaakt te worden door electrostatische ontladingen, tengevolge van een isolatie in de lager.

Het meest overtuigende bewijs, dat statische electriciteit de oorzaak kan zijn van explosies, is ongetwijfeld geleverd in een meelfabriek te Stockton⁴²⁾ in Californië. In deze fabriek waren verschillende kleine explosies in de maalinrichtingen voorge-

³⁹⁾ Report on fires occurring in threshing separators in eastern Washington in the summer of 1914. Experiment Station, State College of Washington, Bull. No. 117, p. 10.

⁴⁰⁾ Price and Brown, p. 181.

⁴¹⁾ Price and Brown, p. 152.

⁴²⁾ Price and Brown, p. 156.

komen. Het frame vertoonde dan ook sterke positieve, de drijf-as negatieve ladingen. Een deel van den metalen buitenwand der maalinrichting werd nu vervangen door glas, zoodat men in het apparaat kon kijken, terwijl het in bedrijf was. Het bleek nu, dat, voorafgaande aan een explosie, in den molen eerst van tijd tot tijd en daarna continu een reeks vonken oversprongen van de maalschijven naar den buitenwand. Toen ten slotte als het ware een vonkenregen optrad, vond een explosie plaats. De kleur der vonken was lichtblauw, de karakteristieke kleur van ontladingsvonken van statische electriciteit (de kleur van vonken, bestaande uit gloeiende metaal- of steendeeltjes is nl. geelachtig).

Van de stofexplosie, welke in ons land in 1931 in een geheel nieuw gebouwde dextrinefabriek plaats vond, wordt ook vermoed, dat zij het gevolg is geweest van een ontlading van statische electriciteit ⁴³⁾.

Wanneer de vochtigheid der atmosfeer relatief hoog is, zal de statische electriciteit, welke opgewekt wordt, onmiddellijk weglekken; gedurende een periode van groote luchtvochtigheid zal dus het aantal explosies en branden, tengevolge van ontladingen van statische electriciteit, afnemen. Dit is nader nagegaan door D. J. Price en H. H. Brown ⁴⁴⁾.

Als object van onderzoek werden gekozen katoenontpittingsfabrieken. Tegelijkertijd met verschillende bijzonderheden over optredende explosies en branden werd ook de relatieve vochtigheid voor de betreffende streek van dag tot dag genoteerd. Een vergelijking van de frequentie der branden met de gemiddelde relatieve vochtigheid is afgebeeld in figuur 15. De bovenste curve geeft het aantal branden weer, welke per dag plaats vond, de curve beneden geeft een beeld van het verloop der relatieve vochtigheid. Uit de figuur blijkt, dat inderdaad, zooals verwacht mocht worden, het grootste aantal branden heeft plaats gevonden gedurende perioden van geringe vochtigheid; er is overeenstemming in het verloop der curven. Het bleek verder, dat het grootste aantal branden

⁴³⁾ Centr. Versl. Arbeidsinsp. 1931, p. 92.

⁴⁴⁾ Dust Explosions, p. 183.

plaats vond tusschen twee en vijf uur 's middags, het deel van den dag, waarop de temperatuur meestal het hoogst is en de relatieve vochtigheid het laagst.

Teneinde nu ladingen van statische electriciteit te verwijderen, heeft men, in het bijzonder in de katoenindustrie, aan de lucht een voldoende vochtigheid gegeven. In andere industrieën zijn de nadeelen van de bevochtiging dikwijls grooter dan de voordeelen en is zij ook economisch niet verantwoord.

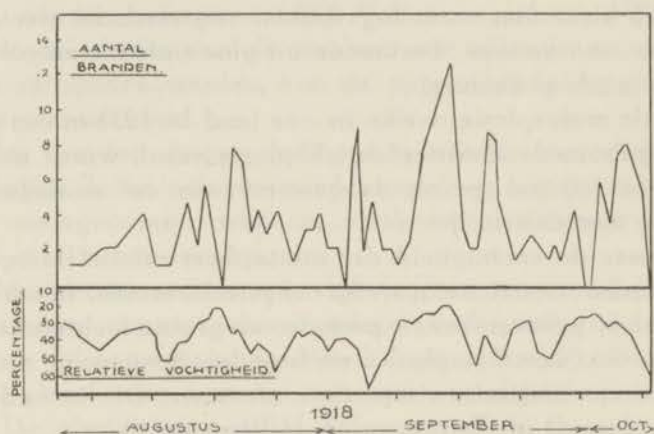


Fig. 15. Verband tusschen de relatieve vochtigheid en het aantal branden voorgekomen in de Vereenigde Staten in den zomer van 1918.

In een zeer langdurige droge periode in 1917 deden zich in de westelijke staten van Noord-Amerika zeer bijzondere verschijnselen voor tengevolge van de oplading met statische electriciteit. Deze oplading was vaak zoo groot, dat het niet mogelijk was met de machines te werken. In de katoenontpittingsmachines kleefde het katoen zoo sterk aan de metalen deelen, dat de machine verstopt werd. Vonken van 10 tot 15 cm konden aan de verschillende metaaldeelen onttrokken worden. Door met stoom of sproeiers de lucht te bevochtigen, konden deze moeilijkheden overwonnen worden.

Een ander voorbeeld van den invloed van de vochtigheid betreft twee gelijke transportbanden van rubber, waarvan de eene graan van een elevator naar een silo transporteerde, terwijl

de andere hetzelfde product vervoerde in de kelderverdieping. De eerste band vertoonde, hoewel geleiding en wrijving niet noemenswaard waren, ladingen tot 45000 Volt, de laatste slechts ladingen tot eenige honderden Volts; in de kelderverdieping was echter de lucht vochtiger dan boven in de silo.

Enkele proeven door Beyersdorfer⁴⁵⁾ genomen, om de enorme opladingen te demonstreeren, welke ontstaan door het wrijven van stof langs metalen vlakken, zijn zeker nog het vermelden waard. Hij gebruikte een uitgeholden halven ijzeren kogel, afgesloten met twee halfcirkelvormige staalplaatjes, waartusschen zich een zeer fijne spleet bevond⁴⁶⁾. De holle ruimte was gevuld met suikerstof, dat er met kracht, door het inleiden van zuurstof uit een cylinder, uit werd gedreven. Bij deze proef vertoonde de spleet over haar geheele lengte een lichtverschijnsel. Werd op ± 5 mm afstand van de spleet een geaarde koperdraad gespannen, dan lichtte ook deze sterk op, terwijl tusschen spleet en draad kleine vonkjes oversprongen. Hij slaagde er niet in met deze vonken direct stofwolken te ontsteken. Werd stikstof inplaats van zuurstof gebruikt, dan waren de lichtverschijnselen van denzelfden aard, doch nu violet inplaats van lichtblauw. Het lichtverschijnsel is dus niet van de suiker, maar van het gas afhankelijk. Door het opwervelen van suikerstof met een gas kunnen dus zulke hoge electriche spanningen opgewekt worden, dat hun ontladingen het gas tot lichten brengen.

⁴⁵⁾ P. Beyersdorfer, Ber. **55**, 2582 (1922); Z. Ver. deut. Zucker-Ind. **72**, 502 (1922).

⁴⁶⁾ Z. Ver. deut. Ing. **66**, 203 (1922).

HOOFDSTUK IV

A. **Onderzoek naar den invloed van een hogere temperatuur op de explosiviteit van dextrine-luchtmengsels.**

Bij het zoeken naar de oorzaak van de dextrine-explosie, voorgekomen in een van de droogtrommels eener dextrine-fabriek hier te lande, rees ook de vraag, of de in den trommel heerschende temperatuur (ongeveer 170° C.) een explosiebevorderenden invloed zou hebben gehad. Het scheen mogelijk, dat de explosiegrens van dextrine sterk verlaagd wordt door verhooging der temperatuur.

Om dit te onderzoeken, werden de explosiegrenzen van dextrine bij gewone temperatuur en bij 170° C. bepaald. Daartoe werd het explosietoestel geplaatst in een electrischen oven. In fig. 16 is dit toestel afgebeeld aan de linkerzijde. Het verschilt slechts van ons explosietoestel, dat voor proeven bij gewone temperatuur werd gebruikt (zie blz. 53), doordat het een langeren hals heeft. De er omheen gebouwde electrische oven was in staat de temperatuur van de ruimte er binnen op te voeren tot 170° C. Deze oven bestond uit twee binnen elkaar geplaatste bussen. Rond de binnenste bus was weerstandsdraad gewonden, van den oven geïsoleerd door asbestpapier. Buiten den weerstandsdraad volgde dan wederom een laag asbestpapier; de verdere ruimte tusschen de bussen was geheel gevuld met isolatiemateriaal (asbest). Ter hoogte van het schaalte en de ontstekingsinrichting bevinden zich twee openingen in den oven, waar doorheen de explosie kon worden waargenomen. De temperatuur in den oven kon zoowel binnen als buiten het explosietoestel worden gemeten. De ruimte tusschen den hals van het explosietoestel en den oven was afgesloten door een gummiring. Behalve het explosietoestel zelf, moest ook de lucht,

waarmede het stof verstoven werd, gebracht worden op de temperatuur, waarbij de explosie wordt gemeten. Daartoe was in de aanvoerleiding dezer lucht een verwarmingsapparaatje aangebracht, bestaande uit een rondbodemkolf, geplaatst in

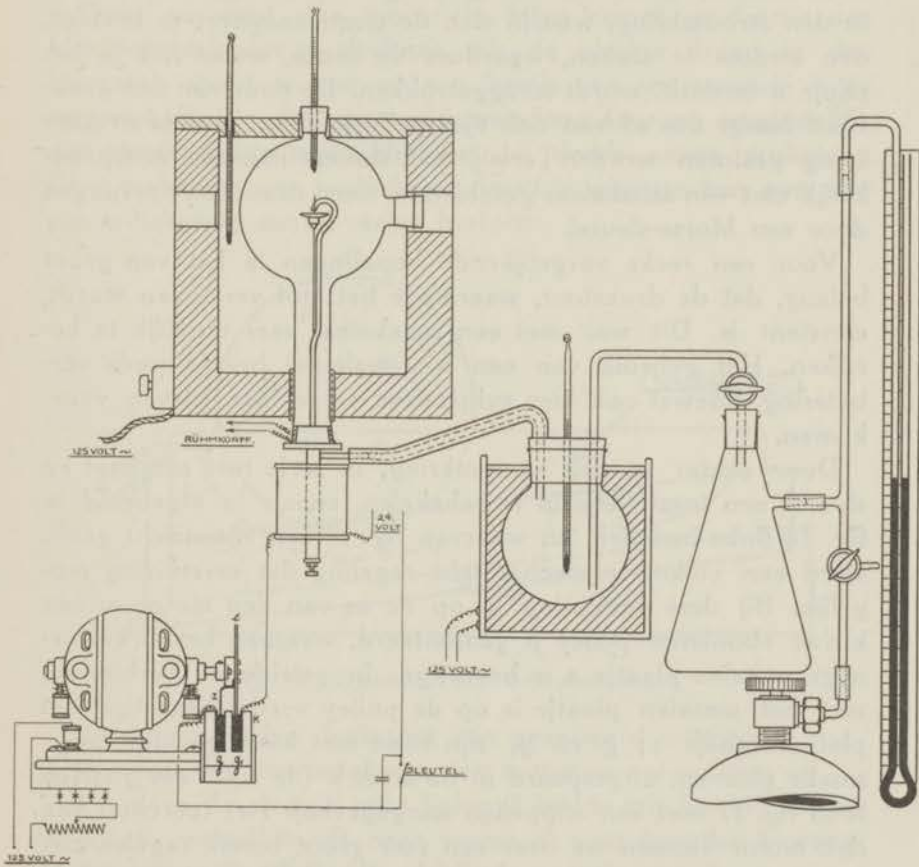


Fig. 16. Toestel voor het meten van explosiegrenzen bij hoge temperaturen.

een blikken bus, waar omheen een verwarmingsdraad was gewonden. De ruimte tusschen bus en kolf was geheel gevuld met isolatiemateriaal (asbest). De leiding, loopende van verwarmingsapparaat naar explosietoestel, was tegen warmteverlies geïsoleerd. De lucht werd geleverd door een cylinder, waar-

in zij op een druk van eenige atmosferen was gebracht.

Zooals we bij de beschrijving van het explosietoestel gezien hebben (zie blz. 54), wordt het stof verstoven door een drukstoot, welke ontstaat door aan de in de toevoerleiding onder druk staande lucht een uitweg te geven. Dit geschiedt door in den stroomkring, waarin zich de electromagneet *m* bevindt, den stroom te sluiten, waardoor de conus, welke zich in het pijpje *a* bevindt, wordt teruggetrokken. De duur van den drukstoot hangt dus af van den tijd, gedurende welken de stroomkring gesloten wordt. Terwijl het sluiten daarvan oorspronkelijk met een schakelaar geschiedde, werd deze later vervangen door een Morse-sleutel.

Voor een reeks vergelijkende bepalingen is het van groot belang, dat de drukstoot, waarmede het stof verstoven wordt, constant is. Dit was met een schakelaar zeer moeilijk te bereiken. Het gebruik van een Morse-sleutel bracht reeds verbetering, hoewel ook hier subjectieve verschillen bleven voorkomen.

Door echter in den stroomkring, in serie met magneet en sleutel, een toestelletje in te schakelen, zooals is afgebeeld in fig. 16 links beneden, en waarvan fig. 17 een zijaanzicht geeft, werd een volkomen mechanische regeling der verstuiving mogelijk. Bij deze inrichting is op de as van den motor *m* een kleine ebonieten pulley *p* gemonteerd, waaraan het cirkelvormige metalen plaatje *e* is bevestigd. In geleidende verbinding met het metalen plaatje is op de pulley verder bevestigd het platinadraadje *z*; *g* en *g*₁ zijn twee met kwik gevulde lange smalle gleuven, uitgespaard in de slede *k* (de vorm der gleuven is in fig. 17 met een stippellijn aangegeven). Het toerental van den motor kunnen we over een zeer groot bereik regelen met een lampenweerstand in serie met een schuifweerstand. Wanneer de motor nu in bedrijf wordt gesteld, zal de platinadraad telkens slechts zeer korten tijd met het kwik in aanraking komen, terwijl het metalen plaatje *e* voortdurend met het kwik in contact blijft. Wanneer de kwikbakjes nu beide in den stroomkring: magneet, stroombron, Morse-sleutel, rotercontact opgenomen zijn, zal in den geteekenden stand van den motor de stroom doorgaan, indien de Morse-sleutel neergedrukt is. Wan-

neer nu de as van den motor langzaam draait, zal, indien de sleutel neergedrukt is, telkens een oogenblik stroomdoorgang plaats vinden wanneer het platinadraadje door het kwik beweegt. Telkens wordt dan een kleine hoeveelheid lucht op het tafeltje geblazen.

Door nu eerst den motor te laten loopen en daarna den Morse-sleutel neer te drukken, als de platina draad in den hoogsten stand is, zal na een fractie van een seconde in de explosiekolf een drukstoot plaatsvinden; door nu onmiddellijk den sleutel los te laten, blijft het bij dezen eenen drukstoot. Een drukstoot van volkomen dezelfde grootte kan men zoo een willekeurig aantal malen herhalen.

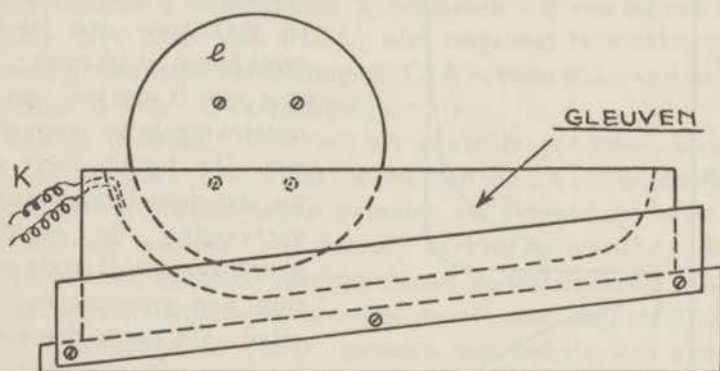


Fig. 17. Zijaanzicht van het roteercontact.

De duur van den drukstoot kan gevarieerd worden:

- 1^o. door het toerental van den motor te veranderen en
- 2^o. door de slede k naar links of rechts (zie fig. 17) te verschuiven, waardoor zij naar boven of naar beneden beweegt en waardoor de platinadraad bij de rotatie een langeren of korteren tijd met het kwik in aanraking is.

Bij de proeven, welke met dit explosieapparaat verricht werden, bleek nu, dat inderdaad de explosiviteit bij $\pm 170^{\circ}$ C. (de temperatuur der droogapparaten) belangrijk hooger was dan bij kamertemperatuur.

In figuur 18 is op de horizontale as afgezet het aantal mg stof, dat verstoven werd, en op de verticale as de drukstoot

in mm kwik. (De grootte van den drukstoot wordt nl. altijd

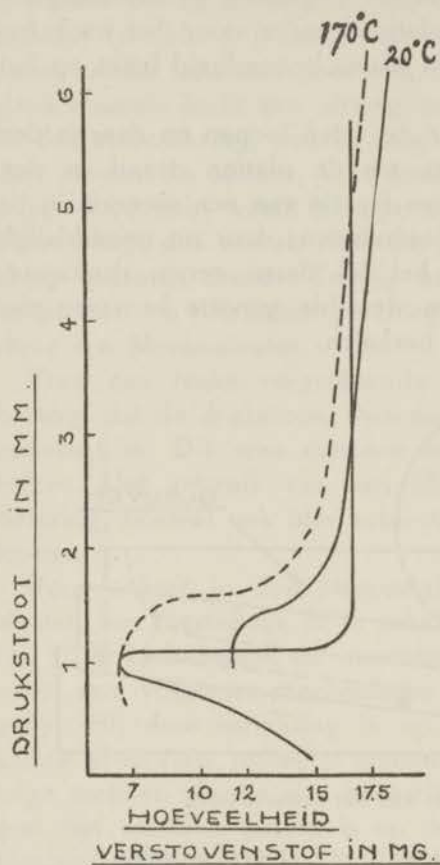


Fig. 18.

Afhankelijkheid van de explosiegrens van den drukstoot.

Verschuiving van de explosiegrens bij stijging der temperatuur.

bij 170° C. reeds bij een geringe dichtheid der stofwolk explosie kan optreden. Een hogere temperatuur, zooals die in de droog-apparaten voorkomt, vergroot dus de explosiviteit van de dextrine.

De derde lijn in fig. 18 heeft betrekking op aluminium. Het verloop der curve is bij beide stoffen in groote trekken gelijk.

gemeten door op den manometer de drukvermindering af te lezen, welke in de toevoerleiding is ontstaan.)

De figuur toont ons de benedenexplosiegrenzen van dextrine bij 170° C. (links — — —) en bij 20° C. (rechts ———). We zien dat bij een krachtigeren drukstoot meer stof noodig is om een explosie te verkrijgen dan bij een zwakkeren drukstoot; het stof wordt sterker van de ontstekingsbron weggeblazen. De figuur leert ons nu, dat door temperatuursverhooging de explosiegrens verschuift in de richting van grotere explosiviteit. De vorm der curve is voor de verschillende soorten van toestellen, in gebruik voor het bepalen van explosiegrenzen van stof-gasmengsels, niet gelijk. De vorm der hier geteekende curve is dan ook karakteristiek voor het bij ons in gebruik zijnde type.

We zien uit de figuur, dat

B. Onderzoek naar den mogelijken invloed van verontreinigingen in het aardappelmeel.

Het dextrineeren bestaat uit het behandelen van het aardappelmeel met salpeterzuur van 0.03 %; het verkregen product wordt daarna gedroogd en geroost.

Het scheen niet onmogelijk, dat hierbij uit het zetmeel nitraten zouden ontstaan met een vrij lage ontvlammings temperatuur en misschien een groote explosiviteit, terwijl uit aanwezige verontreinigingen (hoofdzakelijk jutevezels) cellulosenitraten gevormd zouden kunnen worden.

Daar de zetmeelnitraten echter steeds bereid worden met geconcentreerd salpeterzuur ¹⁾, behoeven wij ons bij een behandeling met zuur van 0.03 % niet ongerust te maken over de vorming van deze verbindingen. Ook het ontstaan van cellulosenitraten is zeer onwaarschijnlijk.

Eenige proeven, door mij ter contrôle genomen, bleken dit laatste te bevestigen. Daartoe werden de uit het aardappelmeel gezeefde verontreinigingen gemalen en gezeefd en het stof van de kleinste grootte, dat hieruit verkregen werd, op dezelfde wijze als een monster aardappelmeel gedextrineerd.

De verontreinigingen werden eerst met salpeterzuur van 0.03 % aangezuurd (door sproeien met behulp van een spuitflesch) tot er bijna 10 % vocht bij was (totaal vochtgehalte ± 27 %); daarna werd na evacueering gedroogd in een stroom droge lucht, die langzaam door de glazen buizen werd geleid, waarin zich de dextrine bevond. De buizen waren in een oven geplaatst waarvan de temperatuur langzaam werd opgevoerd tot 80° C. Na ± 7 uur was het vochtgehalte gedaald tot 4½ %. Vervolgens werd in een droogstoof gedurende 4 uur geroost bij 120° C (jodiumreactie: kleurloos).

De bepaling van de benedenexplosiegrens van de zoo verkregen stof leerde, dat zij gelegen was bij 45 mg.

Bij de dextrineering van de verontreinigingen worden dus geen stoffen gevormd, welke de explosiegrens verlagen.

¹⁾ Vergelijk W. P. M. Matla, Chem. Weekblad 33, 120 (1936).

C. Onderzoek naar de mate van oplading van niet geaarde metalen oppervlakken als gevolg van het langswrijven van dextrinestof.

Deze statische electriciteit ontstaat, zooals we zagen, door wrijving van het stof langs wanden of andere machinedeelen. Wanneer zij niet naar de aarde kan afvloeien, zal de hoeveelheid electriciteit op die machinedeelen (en dus ook de spanning) voortdurend toenemen. Dit zal doorgaan, totdat het oogenblik wordt bereikt, waarop de spanning groot genoeg is geworden, om een vonk te doen overspringen van het geladen op het meest nabij gelegen geaarde machinedeel. Het is zeer waarschijnlijk, dat deze elektrische ontladingen de belangrijkste bron van ongelukken vormen in bedrijven, waar met stof gewerkt wordt. Dat dextrine-luchtmengsels langs dezen weg tot ontsteking kunnen worden gebracht, is echter tot nu toe nog niet bewezen.

Onder de weinige onderzoekingen, welke op dit gebied gedaan zijn, bevinden zich eenige zeer interessante proeven van S. C. Blacktin en H. Robinson.¹⁾ Zij hebben zich bij hun onderzoek over de zelfoplading van stofwolken speciaal bezig gehouden met kolenstof. Daar hun apparaten ongeschikt waren om met koolpoeder als zoodanig te experimenteren, mengden ze het met steenstof in de verhouding kolenstof : steenstof = 1 : 24. In het door hen daartoe speciaal geconstrueerde toestel, gelukte het, door het stof door een nauwe opening te zuigen, bij een capaciteit van 0.004 $\mu\mu$ F, een spanning van 1300 Volt te bereiken, overeenkomend met een energie van 0.0033 Joule. Bij energiën grooter dan 0.002 Joule bleek het hun mogelijk met de op deze wijze verkregen lading een methaan-lucht-mengsel met 8.5% methaan tot explosie te brengen (zij gebruikten daarbij puntvormige messing-electroden). Bij proeven op groote schaal werden met onvermengde kolenstof spanningen tot

¹⁾ S. C. Blacktin, Spontaneous electrification in dust clouds (with special reference to coal-dust clouds), Safety in Mines Research Board, Paper No. 43, 1928; S. C. Blacktin and H. Robinson, Spontaneous electrification in coal-dust clouds, S. M. R. B., Paper No. 71, 1931.

7500 Volt verkregen (vonken van 3 mm). Bij een enkele proef, welke zij namen met mengsels van rijststijfsel en steenstof, gemengd in de verhouding 1:48, bereikten zij een spanning van 5400 Volt. Aardappelstijfsel bleek onder dezelfde omstandigheden slechts spanningen tot een maximum 2050 Volt te geven; dit moet toegeschreven worden aan het feit, dat aardappelstijfsel uit deeltjes bestaat, welke verscheidene malen grover zijn dan die van rijststijfsel.

De proeven, in het verdere deel van dit hoofdstuk beschreven, zijn nu verricht, om na te gaan in hoeverre ook bij dextrinestof rekening gehouden moet worden met de mogelijkheid, dat het ontstoken kan worden door een ontlading van de statische electriciteit, opgezameld op den wand van een droogtrommel, een pijpdeel of een of anderen geleider, tengevolge van het daarlangswrijven van de dextrinedeeltjes zelf. Zou inderdaad blijken, dat bovengenoemde electricische ontlading in staat was een wolk van dextrinestof te ontsteken, dan zouden we daarmee het bewijs geleverd hebben, dat het mogelijk is, een stofwolk te ontsteken door de energie, die als lading der stofdeeltjes in de wolk zelf aanwezig is, zonder toevoering van een speciale ontstekingsenergie van buiten. Deze energie zou een andere vorm zijn van de bewegingsenergie, welke de deeltjes in de verschillende deelen van het toestel verkrijgen.

Bij de nu volgende beschrijving van onze proeven zullen we achtereenvolgens behandelen:

- a. de proeven met het oorspronkelijke toestel;
- b. de proeven, genomen ter bepaling van de energie, noodig om een gas-, respectievelijk stof-luchtmengsel tot explosie te brengen;
- c. de proeven met het verbeterde toestel.

a. De in de literatuur beschreven toestellen, welke de lading moeten aantoonen, welke stof krijgt bij zijn wrijving over metaaldeelen, bestaan meestal uit een gedeelte, dat voor de vorming van een min of meer gelijkmatige stofwolk moet zorgdragen en uit een gedeelte, dat de lading, welke de deeltjes door wrijving veroorzaken, moet opnemen en bewaren.

In het toestel, dat wij geconstrueerd hebben (zie fig. 19), bevindt zich boven in de verticale buis i een zeef, welke in regelmatige trilling wordt gebracht door den klepel f. Boven de zeef bevindt zich een hoeveelheid stof, die bij een voldoende sterke trilling door de mazen als een regelmatige stroom naar beneden valt. Dit stof valt dan op de, onder een hoek van 30°

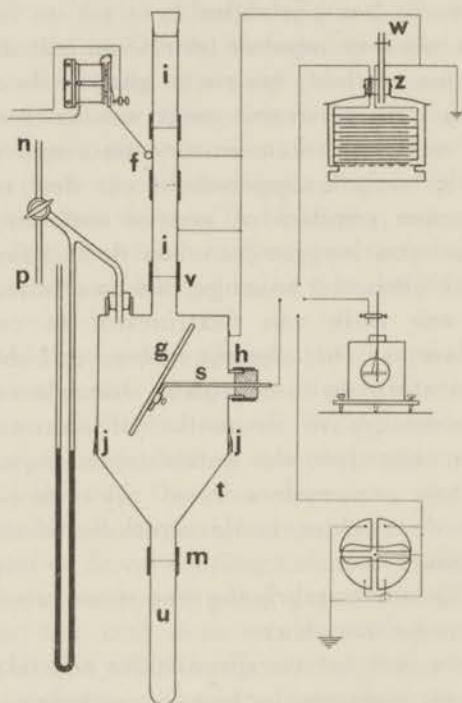


Fig. 19.

met de loodlijn opgestelde, koperen plaat g, welke aan het huis j is verbonden door middel van een koperen staaf, in barnsteen geïsoleerd.

Door wrijving met de plaat krijgt het stof een lading, terwijl de plaat zelf een even groote lading met het tegengestelde teeken opneemt. Wanneer er nu voortdurend stof op de koperen plaat blijft vallen, zal deze ook steeds meer lading toegevoerd krijgen, zoodat het voltage langzamerhand zal toenemen. We

kunnen den ladingstoestand van de plaat nagaan door haar te verbinden met een electroscoop. Wanneer het stof met de plaat in aanraking is geweest, valt het via den trechter *t* in het buisje *u*, van waaruit het van tijd tot tijd verwijderd kan worden. Het huis is vervaardigd van koperblik en bestaat uit twee deelen, welke in elkander geschoven kunnen worden bij *j*.

Alle verbindingen in het toestel zijn door gummislang vacuumdicht afgesloten (b.v. bij *h*, *m* en *j*), terwijl het staafje *s* stevig in het barnsteen is vastgekit. Hierdoor is het mogelijk, dat het geheel luchtledig kan worden gezogen. Het apparaat moet daartoe bij *n* verbonden worden met de luchtpomp. Alvorens het apparaat in gebruik te nemen, hebben we eerst onderzocht, of ladingen, op de plaat gebracht, niet al te snel wegglekten. Het apparaat werd daartoe verbonden met den electroscoop; met behulp van een geladen glasstaaf werd op het toestel een lading gebracht van zoodanige grootte, dat de electroscoop zijn maximalen uitslag vertoonde. Daarna werd de tijd gemeten, in welken ongeveer de helft van de lading was weggelekt. Deze was oorspronkelijk vrijwel nul, omdat alle oppervlakken en ook de omgevende lucht vochtig waren. Door nu het apparaat geheel luchtledig te zuigen en het zoo eenige uren te houden en daarna via *p* lucht, gedroogd door chloorcalcium en geconcentreerd zwavelzuur, toe te laten stroomen, werd de vochtigheid, en dus het lekken, sterk verminderd. In de droge zomermaanden was deze werkwijze, één of tweemaal toegepast, meestal voldoende om den lektijd (tijd waarin de lading tot ongeveer de helft vermindert = de tijd waarin het blaadje van den electroscoop ongeveer de geheele schaalverdeling doorloopt) van 0 minuten op 30 tot 40 minuten te brengen. In de nattere herfstmaanden was het echter zeer moeilijk om op deze wijze een behoorlijken lektijd te verkrijgen. We hebben daartoe om het apparaat heen een electrischen oven gebouwd, zoodat we het geheele toestel konden verwarmen. Nadat de oven ingeschakeld was werd na eenigen tijd een temperatuur van 130 tot 150° C. bereikt. Het apparaat werd nu luchtledig gezogen en eenige uren in dezen toestand gehouden. Vervolgens werd droge lucht toegelaten en de oven uitgeschakeld. Door deze wijze van handelen was de lektijd meestal voldoende groot ge-

worden, om de proeven te kunnen verrichten. Was dit niet het geval, dan werd het verwarmen en leegzuigen nog eenmaal herhaald. Door deze wijze van handelen waren we er van verzekerd, dat de lading, welke het stof aan de plaat meedeelde, niet met zoo groote snelheid zou weglekken, dat de electroscoop geen uitslag zou vertoonen. Het eerst werd nu de oplading onderzocht, veroorzaakt door eenige zouten en oxyden, zooals bariumsulfaat, aluminiumoxyde, kiezelzuuranhydride en aluminiumsilicaat, en vervolgens van zwavel, dextrine en calciumlactaat. Bij al deze stoffen vertoonde de electroscoop (verbonden aan de plaat, waarop het stof viel) een uitslag, welke met den tijd toenam. Bij de verschillende stoffen verschilde de uitslag, welke in een bepaalden tijd bereikt werd, in grootte. Bij zwavel en dextrine was hij het grootst, maar bij deze stoffen trad een onaangenaam effect op, eenigen tijd nadat de proeven een aanvang hadden genomen. De stofdeeltjes vielen dan niet meer op de gewone wijze langs de plaat heen, doch bleven er op plakken, zoodat weldra de geheele plaat met een heuvel van stof was bedekt, welke er slechts van tijd tot tijd afschoof. Te beginnen met het oogeblik, dat het stof bleef plakken, kwam natuurlijk het vallende stof niet meer in aanraking met de plaat en hield de toevoer van nieuwe lading op. Noch door tikken tegen het koperen huis of tegen het koperen staafje, waaraan de plaat verbonden was, noch door het blazen van een krachtigen luchtstroom langs de plaat, was het mogelijk het plakken te verhinderen. Is eenmaal een eerste laagje gevormd, dan hoopt het stof zich snel op. Het bleek ons niet mogelijk het euvel op te heffen met behoud van dit toestel. We hebben daarom later voor stoffen, zooals zwavel en dextrine, een nieuw toestel gebouwd, waarbij er speciaal op gelet was, dat plakken niet meer zou kunnen voorkomen. Van de stoffen, welke niet op de plaat bleven plakken, gaf bariumsulfaat de beste resultaten, terwijl aluminiumoxyde in dit opzicht op de tweede plaats stond.

Wanneer een proef werd ondernomen, werd het stof eerst goed gedroogd door het eenige uren op 120° C. te verhitten en het daarna in den exsiccator te laten afkoelen. We brachten nu een deel van het stof op de zeef en schakelden den klepel

in. Indien de mazen der zeef nu van de goede grootte waren, (we beschikten over een viertal zeven van verschillende maaswijdte) viel er een gelijkmatige stofstroom op de plaat, om vandaar via den trechter het toestel weer te verlaten. De electroscop vertoonde een langzaam toenemenden uitslag. Het bleek op deze wijze mogelijk om in $\pm \frac{3}{4}$ minuut aan electroscop en plaat een potentiaal van 300 Volt te geven. De electroscop had dan zijn maximalen uitslag bereikt, zoodat het noodzakelijk was de capaciteit van het stelsel te vergrooten, wilden we meer lading kunnen verzamelen.

Daar het zeer waarschijnlijk was, dat we gedurende de verdere proeven geregeld condensatoren noodig zouden hebben

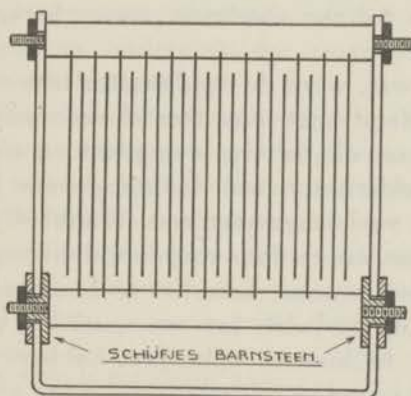


Fig. 20. Condensator geïsoleerd in barnsteen.

om groote ladingen te verzamelen, hebben we ons moeite gegeven om een condensator te vervaardigen, die weinig of geen lek vertoonde. Alle in den handel verkrijgbare blokcondensatoren bleken daartoe ten eenenmale ongeschikt, daar zelfs de beste binnen één of enkele seconden hun lading geheel hadden verloren. Beter geschikt waren echter de

variabele luchtcondensatoren, zooals die in de radiotechniek veel in gebruik zijn. Als meest geschikten vorm kozen we tenslotte een condensator van 500 cm, bij welke de platenstellen van elkander geïsoleerd waren door kleine schijfjes „persbarnsteen”. Door deze „persbarnsteen” door schijfjes echte barnsteen te vervangen, en door de geheele condensator in volkomen droge lucht op te stellen, bleek het mogelijk een condensator te verkrijgen, waarvan de lekkage zoo gering was, dat de helft der lading eerst verloren was gegaan na een uur tijd.

Ten einde den condensator geheel van vocht te bevrijden werd hij opgesteld in een vacuumexsiccator (zie fig. 19 rechts boven). Het eene stel platen werd dan via een draad, welke

zonder meer door de gummistop z was heengevoerd, verbonden met aarde. Het andere stel was verbonden met een draad, welke de geleidende verbinding vormde met het apparaat; deze draad passeerde ook de gummistop z, doch was daarvan geïsoleerd. Daartoe was uit deze stop een cilindertje uitgeboord, hetwelk was vervangen door barnsteen; in de as van dit cilindertje was wederom een klein kanaaltje gemaakt en hier doorheen werd de draad van condensator naar toestel gevoerd. Deze draad werd in het barnsteenen cilindertje vastgekit, zoodat het mogelijk was door een, eveneens in de stop z aangebrachte buis w den exsiccator luchtledig te zuigen. Door dezen vervolgens met droge lucht te vullen en deze manipulatie eenige malen te herhalen, verkregen we een condensator van de reeds genoemde goede kwaliteiten.

Toen dit resultaat bereikt was, werd de condensator tezamen met den electroscoop geleidend met ons toestel verbonden. Viel nu stof door, dan moest dit behalve aan plaat en electroscoop, ook aan den condensator een lading geven. De electroscoop wees dan ook veel langzamer aan. Wanneer we echter het stof goed droogden en er voor zorgden, dat zoowel toestel als condensator lekvrij waren, was het toch mogelijk in ± 3 minuten het geheel op te laden tot een spanning van 300 Volt. Om meer lading te kunnen opbergen, hebben we vervolgens de capaciteit van onzen condensator vergroot, eerst tot 1000, later tot 1500 cm, door in den exsiccator 2 en later 3 condensatoren van 500 cm op te stellen. Steeds duurde het opladen langer en moest dus de lektijd grooter zijn, om niet al te groote verliezen te lijden. Door de zeef grover te nemen, was het echter mogelijk om in denzelfden tijd meer stof door te laten vallen en zodoende in denzelfden tijd een grootere lading te produceeren. Het bleek tenslotte mogelijk, om in ± 5 minuten een capaciteit van 1500 cm op te laden tot 300 Volt. Om echter een vonkje te krijgen bij de ontlading van den condensator, zijn veel hogere voltages noodig. Een vonkengte van 1 mm komt voor spitse electroden overeen met 4800 Volt. Bovendien neemt de energie der vonk ($e = \frac{1}{2} cv^2$) toe met het kwadraat van het voltage, zoodat het zeer gewenscht zou zijn, indien dit verhoogd zou kunnen worden. Daar de electroscoop

zijn maximalen uitslag echter bij 300 Volt had bereikt, werd hij vervangen door een quadrantelectrometer, welke zoodanig was geschakeld, dat hij geschikt was om er hooge voltages mee te meten. Dit is het geval als de vleugel wordt verbonden met één der quadrantenparen²⁾; de uitslag is dan evenredig met het kwadraat van het potentiaalverschil (ε^2), terwijl bij andere schakelingen de uitslag b.v. evenredig is met ε of $\varepsilon - \frac{\varepsilon^2}{const.}$

Bij onze schakeling is $\theta = \frac{1}{2} A \varepsilon^2$, waarin A een constante van het toestel is [$A = \frac{s}{d\pi P}$, waarin s het oppervlak van den vleugel voor een middelpuntshoek één, gerekend voor de beide sectoren samen, voorstelt, d den afstand van den vleugel tot boven- en ondervlak der quadranten en P het torsiekoppel voor een hoek één].

Toen nu dit instrument in gebruik werd genomen, bleek, dat het toch nog te gevoelig was. Een schaaldeel kwam overeen met slechts 2.5 Volt, zoodat het totale meetbereik slechts ± 200 Volt was. Daarom zijn we er toe overgegaan den ophangdraad door een dikkeren te vervangen om zodoende de gevoeligheid te verminderen. (Immers de uitslag θ is evenredig met A , dus o.e. met P . Deze P , het torsiekoppel voor een hoek één, is nu gelijk aan $\frac{\pi E r^4}{4(1 + \mu)l}$ waarin r de straal, E de elasticiteitsmodulus en l de lengte van den ophangdraad voorstellen, terwijl μ de verhouding is van de veranderingen van lengte en breedte bij uitrekking. We zien dus, dat θ omgekeerd evenredig is met r^4 , m.a.w.: door den straal van den ophangdraad b.v. 2 maal te vergrooten, zal de uitslaghoek voor een bepaald voltage 16 maal kleiner worden).

De gevoeligheid was nu, na vervanging van den draad, zoodanig geworden, dat het spiegelbeeldje zich 20 schaaldeelen verplaatste bij een spanningstoename van 300 Volt. Het maximale meetbereik was nu gestegen van 200 tot ruim 1000 Volt.

Alvorens onze proeven voort te zetten, hebben we eerst be-

²⁾ G. J. van Swaay, Magnetische en elektrische metingen, p. 243.

paald, hoeveel energie er noodig was om tusschen spitse electroden een nog juist zichtbaar vonkje te verkrijgen. We hebben daartoe eenige blokcondensatoren van regelmatig afdalende capaciteiten opgeladen tot een spanning van 127 Volt en hen daarna door kortsluiting oogenblikkelijk weer ontladen. We hebben deze manipulatie eenige malen herhaald en kregen daarbij de volgende resultaten:

1^o. een condensator van $4 \mu\mu F$, opgeladen tot 127 Volt, gaf bij oogenblikkelijke ontlading een groote vonk;

2^o. een condensator van $0.1 \mu\mu F$, opgeladen tot 127 Volt, gaf bij kortsluiting een klein ontladingsvonkje; en

3^o. een condensator van $0.01 \mu\mu F$, eveneens opgeladen tot 127 Volt, gaf bij ontlading een vonkje, dat ternauwernood zichtbaar was, soms zelfs in het geheel niet optrad. Het arbeidsvermogen, dat in dezen kleinen condensator werd opgehoopt, is dus juist voldoende om bij ontlading van den condensator een vonkje te geven. Het is gelijk aan $\frac{1}{2} \times 127^2 \times 0.01 \times 10 \text{ erg} = \frac{1}{2} \times 127^2 \times 10^{-8} \text{ Joule} = 0.00008 \text{ Joule}$.

Deze energie zullen we dus bij onze proeven moeten bereiken, willen we een ontladingsvonk zien optreden. Bij onze proeven hadden we te maken met een capaciteit van ruim $1500 \text{ cm} = 1.67 \times 0.001 \mu\mu F$. De spanning, die we moeten bereiken om een vonkontlading te zien plaatsvinden bij kortsluiting, zal dus in ons geval ongeveer gelijk zijn aan:

$$v = \sqrt{\frac{2e}{c}} = \sqrt{\frac{2 \times 8 \times 10^{-5} \times 10^7}{1500}} = 1.03 \text{ c.g.s.-eenh.} = 310 \text{ Volt.}$$

Gedurende het korte moment, dat tusschen lading en ontlading verloopt ($\pm \frac{1}{10} \text{ sec.}$), zal reeds een deel der lading weg lekken. Om dus een vonkontlading te zien optreden bij kortsluiting, zullen we langer moeten opladen om zoodoende een hooger voltage (b.v. 400 Volt) te bereiken dan uit de berekening volgt.

We wisten dus steeds hoever we nog van ons eerste doel (het produceeren van zooveel lading, dat bij kortsluiting een klein vonkje zou optreden) af waren.

Met quadrantelectrometer en condensatorenbatterij werden

nu de proeven voortgezet. Door langdurig een stofstroom door te laten vallen (de voorraad boven werd geregeld bijgevuld), gelukte het ons steeds hoogere voltages te bereiken. Tenslotte was het mogelijk een spanning te verkrijgen van ten naastebij 500 Volt, een spanning dus, welke voldoende was om, bij een capaciteit van 1500 cm, bij kortsluiting een vonkje te geven.

Bij kortsluiting der condensatoren trad inderdaad een vonkje op. Herhaling van het experiment gaf hetzelfde resultaat.

b. Toen nu eenmaal bij een voltage van 500 Volt en een capaciteit van 1500 cm een vonkje verkregen was, was de volgende vraag: „hoeveel maal meer energie is er noodig om een gasexplosie in te leiden en hoe groot is de energie, welke een stofwolk tot ontsteking kan brengen?" Om dit te onderzoeken, moesten we dus allereerst de beschikking zien te krijgen over een hoge gelijkspanning en ten tweede over een groote capaciteit. Gelukkig werd ons op het Kamerlingh Onnes-Laboratorium het gebruik toegestaan van een accumulatorenbatterij (welke ons een gelijkspanning kon leveren tot 1920 Volt) en van een grooten condensator. Deze laatste bestond uit 11 glazen platen van 50 bij 50 cm, welke aan weerszijden met stanniool waren beplakt, en welke geïsoleerd waren opgesteld. Tien van deze platen hadden een capaciteit van ongeveer 4500 cm, terwijl de laatste plaat een capaciteit had, welke ongeveer de helft was van die der andere platen, nl. ± 2250 cm. De totaal beschikbare capaciteit was dus ± 47000 cm ($= 0.052 \mu\mu F$). Van dezen condensator konden zooveel platen gebruikt worden als bij de metingen noodig waren.

De proeven werden nu als volgt ingericht (zie fig. 21): Door den stroomsluiter S te sluiten werd de condensator C via schakelaar P verbonden met de accubatterij A. Door den schakelaar P snel om te zetten ontladde de condensator zich door het gasmengsel G (mits de electroden niet verder dan 0.16 mm uit elkander stonden). Wanneer nu de energie dezer ontladingsvonk groot genoeg was om ontsteking teweeg te brengen, trad explosie op. Indien de energie niet voldoende was, gebeurde er niets en kon, door den schakelaar tweemaal om te zetten, de condensator nogmaals geladen en ontladen worden (dit laatste weer via het gasmengsel). Trad op deze wijze binnen

tien keer een explosie op, dan werd de capaciteit verlaagd. Dit werd zoolang voortgezet, totdat een capaciteit werd bereikt, waarbij door overspringen der vonk geen ontsteking meer optrad. We wisten toen dus bij welke capaciteit en bij welke voltage het betreffende gasmengsel onder de proefomstandigheden (spitse electroden) nog juist tot explosie was te brengen.

Als explosief gasmengsel hebben we een methaan-luchtmengsel gebruikt met 8.5% methaan. Dit is een gasmengsel

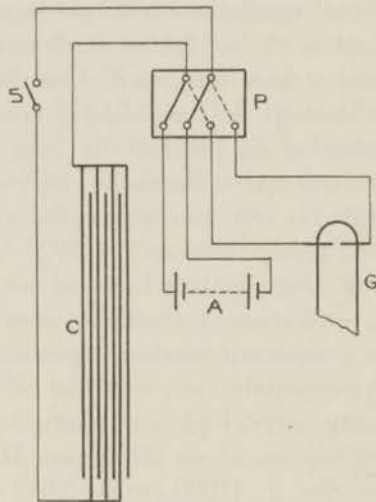


Fig. 21. Schakeling bij de bepaling van de ontstekingsenergie van methaan-luchtmengsels.

uit het centrum van het explosiegebied van methaan en lucht. In tabel XVII zijn nu de waarnemingen samengevat.

De spanning, gebruikt om den condensator op te laden, is steeds 1280 Volt; in de $\frac{1}{10}$ seconde, noodig voor het omschakelen van laden op ontladen, lekt hiervan bijna een derde deel weg, zoodat we slechts een voltage van 900 Volt mogen invoeren in onze berekeningen. (Wanneer we n.l. den condensator laadden tot 1920 Volt, bleek de vonk slechts in staat een afstand van maximaal 0.16 mm te overbruggen, overeenkomende met een spanning van 1300 Volt. De tijd, in welken

TABEL XVII.

AANTAL PLATEN	Bij het laten overspringen van een aantal vonken treedt explosie op bij de:					
	1e maal	3e maal	5e maal	7e maal	9e maal	11e maal en meer
11	3 ×	geen	geen	geen	geen	geen
5	2 ×	"	"	"	"	"
2	3 ×	1 ×	2 ×	1 ×	2 ×	"
1 ^{1/2}	1 ×	—	1 ×	—	—	2 ×
1	geen	1 ×	1 ×	—	1 ×	10 ×
grens 1/2	"	geen	geen	geen	geen	3 ×

de condensator juist geheel ontladen was, bedroeg ± 12 sec.). De capaciteit per plaat was, zooals we zagen, 4500 cm.

Uit de tabel zien we, dat, bij vermindering der capaciteit, het aantal malen, dat bij de eerste vonk explosie optreedt, voortdurend afneemt, terwijl het aantal malen, dat geen explosie bij de eerste vonk optreedt, voortdurend toeneemt. Verder zien we, dat er met een capaciteit van 4500 cm geen explosies meer bij de eerste vonk en bij een capaciteit van 2250 cm in het geheel geen explosies meer optreden. Wel springen dan in het gasmengsel nog vonken over bij het ontladen van den condensator, doch deze zijn te klein om het methaan-lucht-mengsel te ontsteken. Er bestaat dus, zooals hier duidelijk blijkt, een minimumwaarde voor de hoeveelheid energie, noodig om een methaan-lucht-mengsel tot explosie te brengen. Bij het geval, waarbij we nog juist explosie kregen, was de capaciteit $4500 \text{ cm} = 0.005 \mu\mu F$, terwijl het voltage, zooals boven gezegd is, 900 Volt bedroeg. De energie, welke zich dus door het gasmengsel ontladde ($e = \frac{1}{2}cv^2$ en $1 \text{ Volt} = \frac{1}{3} \times 10^{-2}$ electrostatische eenheden terwijl $1 \text{ Joule} = 10^7$ erg) was:

$$\frac{1}{2} \times 4500 \times \frac{1}{9} \times 10^{-4} \times 900^2 = 20250 \text{ erg} = 0.002 \text{ Joule.}$$

Deze waarde komt verrassend goed overeen met de door Blacktin en Robinson gevonden waarde (0.002 Joule), welke ze gepubliceerd hebben in „Paper No. 71” van de „Safety in Mines Research Board”. Uit de goede overeenstemming van

de resultaten van Blacktin en Robinson en van ons mogen we echter niet concludeeren, dat we nu *de* ontstekingsenergie van methaan-lucht (met 8.5% methaan) bepaald hebben. Immers zijn beide waarden verkregen door elektrische ontsteking tusschen puntvormige electroden. Om met zekerheid te kunnen zeggen, dat er een grensenergie bestaat voor de ontsteking, welke ook de omstandigheden zijn, moeten meer proeven genomen worden waaronder ook met electroden van anderen vorm.

Dat er echter een dergelijke waarde bestaat, maken de proeven van Blacktin en Robinson en van mij wel waarschijnlijk. Blacktin en Robinson verkregen nl. hun ontstekingsenergie door een vonk te laten overspringen bij een cap. van 0.001 $\mu\mu F$ en een electrodenafstand van 0.39 mm, terwijl wij dezelfde waarde vonden bij een cap. van 0.005 $\mu\mu F$ en een electrodenafstand van 0.16 mm.

Van het feit, dat we niet geheel zeker zijn of we de algemeen geldige ontstekingsenergie bepaalden, hebben we bij onze verdere experimenten geen last ondervonden, daar we daarbij steeds dezelfde electroden hebben gebruikt als bij de bepaling van de grensenergie, terwijl we ook den electrodenafstand niet veranderd hebben.

Zoals we zagen was de energie, welke we bij spitse electroden noodig hadden om juist een vonkje te krijgen, ongeveer gelijk aan 0.00008 Joule. De energie, noodig om een methaan-luchtmengsel tot explosie te brengen, is dus bij spitse electroden ongeveer 25 maal grooter dan die, welke juist tot een vonkje aanleiding geeft.

De tweede vraag, die we ons gesteld hadden was: „hoeveel energie is er noodig om een stofwolk tot ontsteking te brengen?”

Bij de metingen, welke wij wilden doen om deze energie te bepalen, stuitte we op de moeilijkheid, dat de maximumenergie, waarover wij te beschikken hadden, slechts 0.04 Joule was, daar onze grootste capaciteit 47000 cm en ons hoogst bereikbare voltage 1300 Volt was bedroeg.

Langs den volgenden weg hebben we nu eerst bepaald, welke stoffen gemakkelijk zijn te ontsteken en welke moeilijker.

We hebben verschillende poeders in ons stofexplosietoestel blootgesteld aan de ontlading van een klein Ford-inductorium.

De opstelling van het stofexplosietoestel is afgebeeld in fig. 22 (zie ook fig. 10); ze is gelijk aan die, welke op het Anorganisch-chemisch laboratorium geregeld in gebruik is geweest. W is het reservoir, waarin de lucht (of een ander

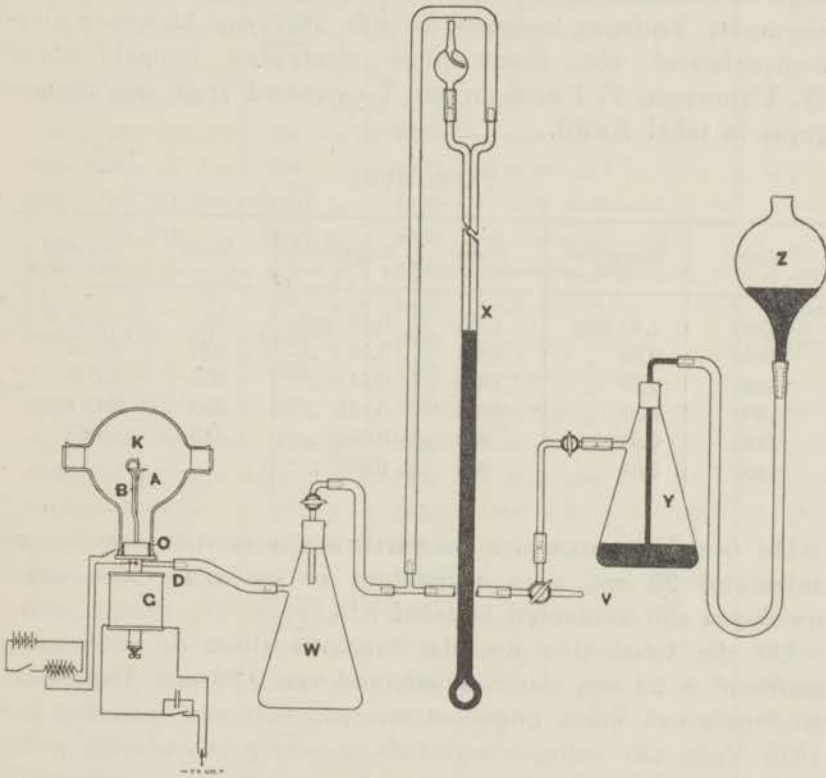


Fig. 22. Opstelling van het stofexplosietoestel.

gas) onder hooger en dan atmosferischen druk kan worden gebracht. Het inductorium is aangesloten aan twee accu's van 4 Volt, in serie geschakeld. Door nu onmiddellijk na elkaar het te onderzoeken stof te verstuiven en de vonk te doen overspringen, werd onderzocht of het stof al dan niet explosief was.

We begonnen nu de explosiviteit van verschillende stofsoorten te onderzoeken bij grooten electrodenafstand en

maakten dezen afstand bij de daaropvolgende proeven voortdurend kleiner. Zoodoende vielen eerst de minst explosieve stofsoorten af, terwijl later ook de meer explosieve niet meer ontploften. Tenslotte bleef alleen zwavel over.

Den electrodenafstand maten we met een meetmicroscop (1 mm komt voor spitse electroden overeen met 4800 Volt; de electrodenafstand is voor grootere voltages ongeveer evenredig hiermede. Voltages overeenkomende met een kleineren electrodenafstand zijn voor spitse electroden bepaald door W. Thomson, F. Paschen en Townsend³⁾; zij zijn samengevat in tabel XVIII).

TABEL XVIII.

Volts	Slagwijdte	Volts	Slagwijdte	Volts	Slagwijdte
5200	1.10 mm	1700	0.23 mm	700	0.060 mm
4200	0.88 "	1300	0.16 "	600	0.044 "
3660	0.75 "	1200	0.13 "	500	0.029 "
2900	0.57 "	1000	0.105 "	400	0.014 "
2450	0.49 "	900	0.092 "	350	0.007 "
1850	0.34 "	800	0.076 "		

De overdruk, waarmee we verstoven, was voor dextrine en suikerstof 20 cm, voor aluminium 10 cm enz. Onze waarnemingen zijn vereenigd in tabel XIX.

Uit die tabel zien we, dat tenslotte alleen de zwavel nog explosief is bij een electrodenafstand van 0.36 mm. Deze electrodenafstand komt ongeveer overeen met een spanning van 1920 Volt. Dit voltage begint de spanning te naderen, welke we maximaal konden bereiken met onze hoogspanningsbatterij. Het zou dus zeer wel mogelijk kunnen zijn, dat de maximale energie, welke we in onzen condensator konden ophoopen (1300 Volt bij 47000 cm), voldoende was om een zwavelwolk tot explosie te brengen. Daartoe werd onze schakeling weer veranderd in die van fig. 21, waarbij nu de plaats van het gasexplosietoestelletje bij G werd ingenomen door het toestel

³⁾ Handbuch für exp. Physik, deel 13; 3e stuk, blz. 127.

TABEL XIX.

STOF	Electr.afst.	Voltage	Resultaat	Overdruk
Dextrine Z.	2.3 mm	—	— + + +	20 cm
„	2.0 „	—	— + + — — —	„
„	<input type="checkbox"/> 1.8 „	—	— + — — — — + — +	„
„	1.4 „	—	— — — — —	„
idem v. d. W. wit	1.4 „	—	+ + +	„
„	1.1 „	5900	+ — — + + +	„
idem geel	0.9 „	4300	— — — — —	„
idem Lind. VII vac.	<input type="checkbox"/> 0.9 „	4300	— — + — + + —	„
„ Lind. VII	<input type="checkbox"/> 0.9 „	4300	— — + + — — —	„
Suikerstof	0.9 „	4300	+ — — + — + —	„
Zwavel	0.9 „	4300	+ +	15 cm
Dextr. v. d. W. wit	<input type="checkbox"/> 0.8 „	3900	— — + — — —	20 cm
„	0.75 „	3660	— — — — —	„
idem Lind. VII vac.	0.75 „	3660	— — — — —	„
„ Lind. VII	0.75 „	3660	— — — — —	„
Suikerstof	<input type="checkbox"/> 0.75 „	3660	— + + — +	„
Aardappelmeel	0.75 „	3660	— — — — —	„
Lycopodium	0.75 „	3660	+ +	10 cm
Aluminium.	0.75 „	3660	+ +	„
Dextr. Lind. n	<input type="checkbox"/> 0.75 „	3660	— + — — — —	20 cm
Zwavel	0.625 „	3130	+ +	15 cm
Suikerstof	0.56 „	2850	— — — — —	20 cm
Lycopodium	<input type="checkbox"/> 0.56 „	2850	+ — — — —	10 cm
Aluminium.	0.56 „	2850	+ — — — + — — + —	„
Dextr. Lind. n	0.56 „	2850	— — — — —	20 cm
Zwavel	0.50 „	2450	+ +	15 cm
Aluminium.	<input type="checkbox"/> 0.36 „	1920	+ — — — — —	10 cm
Zwavel	0.36 „	1920	+ +	15 cm

Electrodenafstand waarbij voor de betreffende stof nog juist explosie optreedt.

voor stofexplosies. De proef bestond weer in het onmiddellijk na elkander doen plaatsvinden van de verstuiving van het stof en het overspringen van de condensatorvonk.

Het bleek, dat inderdaad de energie, welke we maximaal in onzen condensator konden opzamelen, voldoende was om een zwavelwolk (conc. 20 mg/l) te ontsteken. De ontlading dezer energie door een zwavel-luchtmengsel, bij een electrodenafstand van 0.16 mm, had een hevige explosie tengevolge.

Daar het ons moeilijk was den electrodenafstand nog verder te verkleinen, lieten we dezen constant en verminderden de capaciteit. We kregen de volgende resultaten:

TABEL XX.

Stof	Electr.-afst.	Voltage	Capaciteit	Resultaat	Overdruk
Zwavel . .	0.16 mm	1300	10 ¹ / ₂ pl. = 47000 cm	+++	15 cm
„ . .	„	„	4 ¹ / ₂ „ = 20250 „	-++-+	„
„ . .	„	„	3 ¹ / ₂ „ = 15750 „	+---+--+	„
„ . .	„	„	1 ¹ / ₂ „ = 6750 „	+----- grens 2 platen	„
Lycopodium	„	„	10 ¹ / ₂ „ = 47000 „	-----	10 cm
Suikerstof .	„	„	„	-----	20 cm

Uit de tabellen XIX en XX kunnen we nu berekenen de hoeveelheid energie, welke noodig is om een zwavelwolk onder onze proefomstandigheden (spitse electroden) tot ontsteking te brengen. Deze bedraagt:

$$e = \frac{1}{2} c v^2$$

$$e = \frac{1}{2} \times 9000 \times \frac{1}{2} \times 10^{-4} \times 1300^2 = 84500 \text{ erg} \\ = 0.0085 \text{ Joule.}$$

Voor een zwavel-luchtexplosie is dus ongeveer vier maal zooveel energie noodig als voor een methaan-luchtexplosie.

Verder leert ons tabel XIX dat de minimum vonklengthe, waarbij aluminium, lycopodium, suikerstof en dextrine nog juist tot explosie te brengen zijn, respectievelijk gelijk is aan 0.50, 0.65, 0.70 en 0.85 mm.

Indien we in de toekomst de beschikking zouden kunnen krijgen over een gelijkspanningsbron, welke ons zeer hoge voltages zou kunnen leveren, dan zouden we de ontstekings-energieën van bovengenoemde poeders, gedispergeerd in lucht, nauwkeuriger kunnen bepalen. Ik hoop het onderzoek in deze richting voort te kunnen zetten.

c. Toen nu bepaald was hoeveel energie er ongeveer noodig was, om gas- en stofmengsels tot explosie te brengen, werden in het Anorganisch-chemisch laboratorium de proeven voortgezet met het doel om het voltage, dat tot nu toe bereikt was, te verhoogen en zodoende de beschikbare elektrische energie te vergrooten.

Bij de beschrijving van het oude toestel hebben we er reeds op gewezen, dat het zeer goed voldeed voor stoffen van anorganische natuur en van hoog s.g., zooals bariumsulfaat, aluminiumoxyde, zinkoxyde enz., maar dat stoffen, zooals zwavel en dextrine, zich aan de geïsoleerd opgestelde plaat hechtten, en zodoende de voortzetting der proeven onmogelijk maakten, omdat de volgende stofdeeltjes nu niet meer langs de plaat konden wrijven en haar een lading mededeelen. Om aan deze moeilijkheid een einde te maken, hebben we een toestel samengesteld, zooals afgebeeld in figuur 23. Het stof valt evenals bij het oude apparaat door een zeef, welke door een klepel in trilling wordt gebracht. Door de buis a komt het dan in het toestel. Nu valt het echter niet, zooals in apparaat I, op een geïsoleerd opgestelde plaat, doch op een snel roteerenden metalen conus c (blik). Deze slingert het stof met groote kracht tegen een tweeden buiten den eersten kegel geïsoleerd opgestelden conus. Deze buitenste kegel is in het schema voorgesteld door d en met de staafjes e op drie plaatsen bevestigd in drie barnsteendoppen f, f' en t, welke (de staafjes e maken hoeken van 120° met elkander) in kleine tuben in den buitenwand zijn bevestigd. Twee van deze barnsteendoppen hebben een vorm zooals bij f, terwijl de derde door het koperen staafje doorboord wordt (bij t). Door middel van een stukje gummislang h (hetwelk, zooals de figuur laat zien, over dop en tubus is heengeschoven) is de barnsteendop stevig en lucht-

dicht aan den tubus verbonden. Bij den dop t is het door den dop heenstekende koperstaafje in het barnsteen vastgekit. Met dit uitstekende staafje worden de verschillende meetinstrumenten verbonden. Wanneer de binnenconus nu met een zeer groot toerental ronddraait, zal het zwavel- of dextrinestof met zulk een groote snelheid tegen den buitenconus worden geslingerd, dat het er niet meer aan blijft plakken en dus

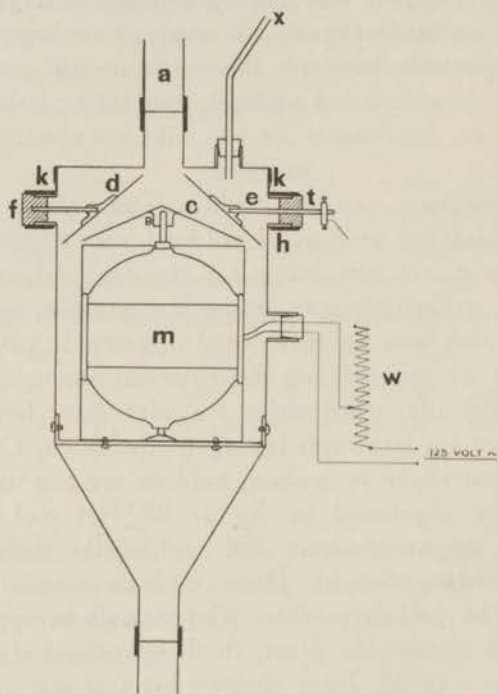


Fig. 23.

niet meer de aanraking van volgende deeltjes belet. Zooals de figuur laat zien, is de draaiende conus bevestigd op de as van een kleinen electromotor m, welke in een gesloten metalen doos is opgesteld, opdat de werking niet door het rondwarrelende stof belemmerd zou worden. Het toerental van dezen motor kan worden geregeld met den weerstand w. Wanneer het stof nu langs den geïsoleerden conus is gestreken, valt het links en rechts langs de binnenbus en dan

via den trechter onderaan het apparaat in een verzamelruimte. Om binnen in het apparaat veranderingen of herstellingen te kunnen aanbrengen, is het zoodanig geconstrueerd, dat het deksel afneembaar is. Dit deksel heeft een opstaanden rand, welke, wanneer de bus gesloten wordt, bij k over den buitenwand van de bus heenschuift. Het geheel kan dan luchtdicht afgesloten worden door een reep gummi, welke om de bus heen gespannen en er daarna op vastgekit wordt. Door de zorgvuldige afsluiting van alle openingen in den buitenwand bleek het mogelijk het apparaat practisch geheel luchtledig te zuigen. De pomp werd dan aangesloten aan x. Nadat het apparaat gedurende twee uren op vacuum was gehouden, werd de onderdruk opgeheven door droge lucht in het apparaat te laten stroomen (gedroogd in twee torens met sterk zwavelzuur en één toren met korrels calciumchloride). Was de druk binnen en buiten gelijk geworden, dan werd de geïsoleerd opgestelde conus verbonden met den electroscoop, aan het geheel een lading gegeven, en nagegaan hoe lang het duurde voordat een bepaald deel dezer lading was weggelekt. De electroscoop (uitgerust met kijker en schaalverdeeling) toonde aan, dat het stelsel de helft van zijn lading verloor in ± 40 minuten. Dit lekverlies was voldoende klein om met de proeven te beginnen. Het apparaat werd verbonden met de condensatorbatterij en met den quadrantelectrometer en als stof werden achtereenvolgens gebruikt zwavel en dextrine. Boven de zeef werd een groote voorraadruimte gebouwd, zoodat de proeven langen tijd achtereen konden worden voortgezet zonder dat ze bij gebrek aan stof behoefden te worden gestaakt. Bij het begin der proef werd nu eerst de motor ingeschakeld en zoodra deze op vol toerental draaide, werd de klepel in werking gebracht, zoodat de stofstroom door het toestel begon te vallen.

Zwavelstof laadde op deze wijze onze condensatorenbatterij (welke nu uit 5 eenheden bestond en een capaciteit had 2500 cm) in $1\frac{1}{2}$ minuut op tot 600 Volt, hetgeen in combinatie met genoemde capaciteit een voldoende hooge spanning bleek te zijn om bij ontlading een klein vonkje te veroorzaken. Deze proef kon met groote regelmatigheid herhaald worden.

Toen we de zwavel door dextrine vervingen (gedroogde fabrieksdextrine, welke geen bijzondere nabehandeling had ondergaan) bleek, dat bij wrijving van deze stof op de metalen deelen van het toestel, nog veel grootere ladingen optraden. In $\frac{3}{4}$ tot 1 minuut werd een spanning bereikt van ± 900 Volt, zoodat reeds op dat oogenblik de ontlading aanleiding gaf tot een vonk. In 1 tot $1\frac{1}{2}$ minuut was de uitslag van den electrometer van zoodanigen aard, dat het spiegelbeeldje van de schaalverdeeling afliiep. We zijn er daarom toe overgegaan om den ophangdraad wederom te vervangen door een zwaarderen, opdat de uitslagen binnen het afleesbare zouden blijven. Nadat de aflezing op deze wijze verbeterd was, werden de proeven

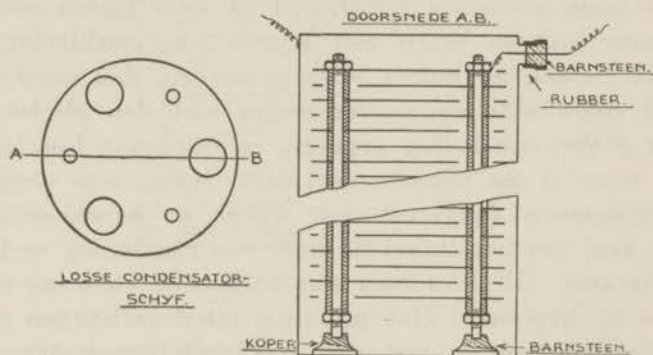


Fig. 24. Lekvrije condensator met hooge doorslagspanning (± 10.000 Volts).

voortgezet. We lieten nu gedurende een langeren tijd (2 tot 3 minuten) stof doorvallen en kregen op deze wijze evenredig grootere uitslagen. Het voltage was na 3 minuten ± 1500 Volt.

Om in onze behoefte aan condensatoren van behoorlijke capaciteit, zeer hooge doorslagspanning en een gering lek te voldoen, hebben we vervolgens een grooten condensator gebouwd met een capaciteit van 2400 cm. Fig. 24 geeft van dezen condensator een horizontale en verticale doorsnede te zien. In een koperen bus van 23 bij 36 cm zijn op de hoekpunten van een regelmatigen zeshoek in verticalen stand een zestal staven opgesteld. Een drietal van deze staven staat onmiddellijk

op den bodem, terwijl de drie andere daarvan door barnsteen zijn geïsoleerd. De geïsoleerde staven staan om en om. De condensatorplaten worden gevormd door een 54-tal cirkelvormige blikken platen, elk voorzien van een zestal gaten, 3 groote en 3 kleine. Voor de verdere constructie van het toestel hebben we een buis, met een inwendige doorsnede, welke even grooter was dan de uitwendige doorsnede van de genoemde staven, in gelijke deelen elk van 6 mm lengte verdeeld. Op deze wijze werd een groote hoeveelheid kleine ringen verkregen.

De stapeling der condensatorplaten geschiedt nu als volgt. De eerste laag bestaat uit ringetjes, om elk der staven één, daarna volgt het eerste blad, dat dus slechts de staven 1, 3 en 5 raakt; daarboven volgt weer een zestal ringetjes, 3 op het blad en 3 op de eerste ringenlaag. Nu volgt blad twee met de kleine gaten rond de staven 2, 4 en 6. Daarna volgt weer een laag ringen en vervolgens weer een plaat met de kleine gaten om de staven 1, 3 en 5. De platen raken dus om den ander aan de staven 1, 3 en 5 en 2, 4 en 6, terwijl ze in het eerste geval van de staven 2, 4 en 6, in het tweede van de staven 1, 3 en 5 geïsoleerd zijn. De 6 staven zijn aan de bovenzijde onderling door dwarsstaven verbonden, zoodat de platenstellen zich t.o.v. elkaar kunnen bewegen (tusschen de staven 2, 4 en 6 en de dwarsstaven bestaat echter geen geleidende verbinding, kleine barnsteenplaatjes op de bevestigingspunten zorgen voor de isolatie). We hebben hier dus te doen met een heele serie condensatoren (53) welke tezamen één grooten condensator vormen. Terwijl de staven 1, 3 en 5 met de koperen bus verbonden zijn, waarin de condensator staat (deze bus is geaard), zijn de staven 2, 4 en 6 verbonden met een draad, welke geïsoleerd in barnsteen de bus verlaat. Via dezen draad wordt de condensator geladen. Na de constructie werd de koperen bus van een deksel voorzien, dat er op werd vastgesoldeerd. De capaciteit kunnen we berekenen met de formule:

$$c = \frac{KO}{4\pi d}$$

Ze bedraagt 2400 cm.

Door nu de bus luchtledig te zuigen en droge lucht toe te laten, gelukte het den condensator practisch lekvrij te maken. Ook hier werd in korten tijd (± 5 minuten) een spanning van ± 1500 Volt bereikt.

Op de condensatoren was op dat oogenblik dus een energie van 0.003 Joule verzameld, hetgeen volgens onze vroegere proeven voldoende is, om een methaan-lucht-mengsel tot explosie te brengen.

De energie, noodig voor het tot ontploffing brengen van dextrine-lucht-mengsels, is echter grooter, zoodat de proeven voortgezet moeten worden met condensatoren met grootere capaciteit, willen wij door de dan te verkrijgen vonken een explosief dextrine-lucht-mengsel (bijv. bij 170° C.) tot ontsteking brengen.

D. Verhinderung van de ontsteking van explosieve mengsels van lucht en brandbare stofsoorten, dextrinestof in het bijzonder.

In hoofdstuk III zijn de ontstekingsmogelijkheden voor mengsels van lucht en brandbare stofsoorten uitvoerig besproken.

Verscheidene van deze mogelijkheden zijn door strenge voorschriften gemakkelijk uit te schakelen, zooals b.v. open vlammen, brandende (smeulende) tabak, smeulende electriche leidingen enz. Ook de vonken, optredend indien stukjes metaal en steentjes als verontreiniging in het stof aanwezig zijn, kunnen door geschikte voorzorgmaatregelen voorkomen worden; eveneens die, welke een gevolg zijn van „drijfriemenelectriciteit”.

De ladingen, optredend door de wrijving van stof langs metalen machinedeelen, kunnen steeds afgevoerd worden, indien men slechts voor goede aarding zorg draagt.

Daarbij dient men vooral te denken aan de isoleering, die olielaagjes kunnen veroorzaken; ook in zoo'n geval kan men echter door sleepcontacten zorgen voor de afvloeiing van de anders optredende lading.

Een voorbeeld van een ontsteking van een wolk van brandbaar stof door een ontlading, optredend op de wijze, als bij een onweder kan voorkomen, is niet bekend. Steeds bleek ver-

betering der aarding de opgetreden electrostatische ladingen te kunnen afvoeren.

Een mogelijkheid voor het ontsteken van explosieve stof-luchtmengsels blijft bestaan als gevolg van zelfontbranding.

In toestellen b.v., dienende voor het drogen van brandbare poedervormige producten, kunnen deze op plaatsen, welke voor reiniging minder toegankelijk zijn, een langdurige verhitting ondergaan, welke ten slotte tot zelfontbranding kan leiden.

Bij dextrine moet de kans daarop zeer gering geacht worden, daar de ontstekingstemperatuur van deze stof niet minder dan 540° C. is.

Verontreinigingen, gemakkelijker tot ontsteking en ontbranding overgaande dan het product zelf, zullen echter zeer gevaarlijk kunnen zijn.

Maar er bestaat een middel om alle toestellen, waarin een brandbaar product wordt verhit, ongevaarlijk te maken. Men behoeft slechts daarin het zuurstofgehalte van de lucht te verlagen en beneden zekere, gemakkelijk bereikbare, grens te brengen. Bij gele dextrine werd gevonden ¹⁾ dat verlagings van het zuurstofgehalte der lucht tot 15.5%, door toevoeging van stikstof, de ontsteking van de dextrinestofwolk geheel verhinderde.

Gebruikt men kooldioxyde in plaats van stikstof, dan zal, in verband met het sterker doovend vermogen van kooldioxyde ²⁾, van dit gas minder behoeven te worden toegevoegd.

Bij andere brandbare stoffen zal het gevaar bij een eenigszins andere grens ophouden, die echter gemakkelijk vastgesteld kan worden.

Mag het brandbare product met niet-brandbare vaste stoffen worden vermengd, dan kan ook op die wijze de ontplofbaarheid van de stofwolk worden opgeheven ³⁾.

¹⁾ W. P. Jorissen en J. H. de Liefde, *Rec. trav. chim.* **52**, 410 (1933).

²⁾ W. P. Jorissen en N. H. Siewertsz van Reesema, *Z. physik. Chem.* **73**, 163 (1910); W. P. Jorissen en B. L. Ongkiehong, *Rec. trav. chim.* **48**, 1069 (1929).

³⁾ Zie A. A. van der Dussen, *diss. Leiden 1933*, *Rec. trav. chim.* **45**, 873 (1935) en W. P. M. Matla, *diss. Leiden 1935*, *Rec. trav. chim.* **55**, 173 (1936). Het blusschen van brandbare producten, die door een straal bluschwater verstoven kunnen worden, is gevaarlijk, daar de optredende stofwolken ontploffen. Blussching met een straal steenstof kan daar worden toegepast.

GEDACHTENGANG BIJ HET ONDERZOEK EN OVERZICHT VAN DE RESULTATEN.

Daar stofwolken grootendeels als aërosolen moeten worden opgevat, zijn deze disperse heterogene systemen nader beschouwd, vooral wat de vorming, de eigenschappen en het onderzoek aangaat.

Van de stofwolken zijn dan die in bijzonderheden in oogenschouw genomen, welke uit *brandbaar* stof en lucht zijn gevormd en dus tusschen zekere grenzen explosief zijn. Begrijpelijkerwijs zijn deze ontplofbare mengsels vergeleken met de overeenkomstige, gevormd uit brandbare gassen of dampen en lucht. De verschillende factoren, welke zoowel bij gas- als bij stofexplosies een rol spelen en in het bijzonder die, welke alleen bij laatstgenoemde verschijnselen van invloed zijn, werden uitvoerig nagegaan. Daarbij bleek, dat de grootste explosiedrukken gevonden worden, wanneer brandbare stof en zuurstof in stoichiometrische verhouding gemengd zijn. Verder bleek, dat de ligging der explosiegrenzen o.a. afhankelijk is van de chemische samenstelling van het brandbare gas of stof, dus van het aantal moleculen zuurstof, noodig voor de volledige verbranding van een molecuul der verbinding, waarbij natuurlijk de in die verbinding mogelijk reeds aanwezige zuurstof van invloed is.

Bij de bestudeering van de factoren, die alleen bij stofexplosies een rol spelen, kwam vooral de groote invloed van de afmetingen der deeltjes en hun cohaesie sterk naar voren. Een, zij het ook ruwe, methode stelde mij in staat een 16-tal stofsoorten uit de praktijk te rangschikken in volgorde van de cohaesie hunner deeltjes. Dit was van belang in verband met het verschijnsel, dat de explosiviteit van een stofwolk slechts tot zekere grens toeneemt met het kleiner worden der deeltjes. Daarboven heeft de samenballing de overhand. Een door mij gegeven

figuur brengt de maxima van de „explosiviteit-deeltjesgrootte”-curven duidelijk naar voren. Ook konden de meest bekende stofsoorten in een schematische figuur worden gebracht, die den invloed van korrelgrootte en cohaesie op de explosiviteit verduidelijkt. De ligging der „explosiviteit-deeltjesgrootte”-curven blijkt ook samen te hangen met de verbrandingswarmte.

Ten einde een indruk te verkrijgen zoowel van de grootte als van den vorm der deeltjes, werd een twaalfstal poeders bij een vergrooting van 200 maal gefotografeerd. Tevens werd van hen de gemiddelde deeltjesgrootte bepaald, welke van 12μ tot 54μ bleek te varieren.

Naast de deeltjesgrootte en de cohaesie bleek de verbrandingswarmte een kleineren invloed op de explosiviteit (gemeten als explosiedruk) te hebben.

Van de verschillende brandbare deeltjes bleken de ronde of rondachtige als regel een geringere cohaesie te vertoonen dan de hoekige. Behalve van den vorm bleek de cohaesie ook afhankelijk te zijn van de hygroscopische eigenschappen van het deeltje.

Indien de overige eigenschappen gelijk zijn, zal de stof, welke bij verbranding het grootste aantal moleculen gas vormt, de hoogste drukken veroorzaken.

In tegenstelling met de gangbare meening kwam ik tot het besluit, dat de adsorptie van gas geen invloed van belang heeft op de explosiviteit.

Bij het nagaan van den invloed van de minerale bestanddeelen (het aschgehalte) en het vochtgehalte der brandbare stof op de explosiviteit kwam ik er toe o.a. het verband tusschen de verbrandingswarmte en de som van het asch- en watergehalte van een groot aantal soorten steenkool te zoeken. Uit de verkregen curve kon een empirische formule worden afgeleid. Bij een aantal koolhydraten werd eveneens een verband tusschen de verbrandingswarmte en de som van asch- en watergehalte gevonden.

Als resultaat van de analyse van het complex van factoren, dat de explosiviteit van stof-lucht-mengsels beheerscht, bleek het mogelijk een schema op te stellen, dat het onderling verband der verschillende factoren weergeeft.

Het lag voor de hand, dat de verschillende oorzaken van stofexplosies werden verzameld en nader beschouwd. Daarbij bleek, dat de ontsteking van de explosieve stofwolken door elektrische vonken thans de voornaamste plaats inneemt en dat deze vonken steeds moesten worden toegeschreven aan door wrijving opgetreden hoge ladingen.

Daar de aanleiding tot mijn onderzoekingen gegeven werd door een ontploffing in een droogtoestel met dextrine bij een temperatuur van ongeveer 170° C., werd de invloed van die temperatuur op de benedenexplosiegrens nagegaan en een vrij groote verlaging gevonden. De constructie van een roteerend contact sloot den persoonlijke invloed bij het verstuiven van het stof uit. Deze verbetering stelde mij ook in staat nauwkeurig vast te stellen de verandering van de explosiegrens met de intensiteit van den drukstoot der voor de verstuiwing gebruikte lucht.

Ook de invloed, dien mogelijke verontreinigingen op die grens konden uitoefenen, werd onderzocht.

In het bijzonder interesseerde mij het verkrijgen van zoodanige ladingen bij het wrijven van dextrinestof langs metaal, dat vonken van voldoende intensiteit voor de ontsteking van explosieve mengsels konden worden verkregen.

Het eerst geconstrueerde toestel voldeed alleen voor zoodanige stoffen, die niet aan de gebruikte metalen plaat plakten. Dit verschijnsel deed zich in het bijzonder bij dextrine en zwavel voor. Noodig was het daarom een apparaat samen te stellen, waarin het plakken van het stof werd verhinderd. Het nieuwe toestel, waarin een roteerende kegel het stof tegen een geïsoleerden kegel slingert, bleek inderdaad aan de te stellen eischen te voldoen.

Ook gelukte het mij de voor onze proeven noodige lekvrije condensatoren met hooge doorslagspanning te construeeren.

Hoewel door het ontbreken van condensatoren van voldoende groote capaciteit nog niet vonken van zoodanige intensiteit werden verkregen, als noodig om een explosieve dextrinestofwolk te ontsteken, bestaat er bij mij geen twijfel, gezien de resultaten mijner proeven, dat o.a. een vergrooting der capaciteit tot de gewenschte ontsteking zal leiden.

STELLINGEN.

I.

De onderzoekingen van Molt over de snelheid van de reactie van Cannizzaro zijn een groote steun voor de opvattingen van Claisen over het mechanisme dezer reactie.

Diss. Molt, Leiden, 1934, p. 156—164.

II.

De onderzoekingen over actieve stikstof, verricht door Willey c.s. en door Rayleigh, zijn van groot belang voor het verkrijgen van inzicht in den invloed van den wand van een vat op de er in plaats vindende gasreacties.

J. Chem. Soc. 1930, 336, 1146.

Proc. Roy. Soc. London A **151**, 567 (1935).

III.

Jaeckel's berekening van de voor de ontsteking eener stofwolk noodige energie, is niet juist.

Z. tech. Physik **5**, 71 (1924).

IV.

De argumenten, die Asahani en Ishidate aanvoeren voor de structuur van den endo-vorm van borneol, zijn niet voldoende overtuigend.

Ber. **68**, 1029 (1935).

V.

Het ceriumkaliumferrocyanide (met drie moleculen kristalwater) is zeer geschikt voor de gravimetrische bepaling van cero-zouten.

P. Spacu, *Z. anal. Chem.* **104**, 119 (1936).

VI.

Het hoogere soortelijk gewicht van het water, dat verschillende onderzoekers verkregen bij het verbranden van organische verbindingen in lucht en dat zij toeschrijven aan de aanwezigheid van deuterium, is voor een zeer groot deel te danken aan het feit, dat de zuurstof van de lucht een veel grooter percentage aan zware zuurstof bevat dan de zuurstof van het gewone water.

N. Morita en T. Titani, *Bull. Chem. Soc. Japan* **11**, 422 (1936).

VII.

De colorimetrische bepaling met behulp van alizarinesulfozuurnatrium volgens Mussakin heeft niet de bezwaren, welke de bepaling volgens Underhill en Petermann aankleven.

Z. anal. Chem. **105**, 351 (1936).

VIII.

De synthese van imidazolderivaten volgens Weidenhagen en Hermann is te verkiezen boven de bereidingswijze volgens Radziszewski.

Ber. **68**, 1953 (1935).

IX.

Het onderzoek van de infra-rood-absorptiespectra van organische verbindingen is van groote waarde voor de structuurbepaling van die verbindingen.

U. Liddel en C. Kasper, *Bur. Standards J. Research* **11**, 599 (1933).

X.

De formule voor polystyreen met phenylgroepen op de plaatsen 1 en 4 verdient de voorkeur boven die, waarin deze groepen regelmatig over het molecule verdeeld zijn.

T. Midgley Jr., A. L. Henne en H. M. Leicester,
J. Am. Chem. Soc. **58**, 1961 (1936).

XI.

De quantitative bepaling van zirkonium als fosfaat verdient aanbeveling.

N. A. Tananaeff en A. W. Tananajewa, Z. anal. Chem.
104, 346 (1936).

XII.

Het steeds toenemende gebruik van kunstmest zal gemakkelijk kunnen leiden tot het ontbreken in ons voedsel van enkele van het groote aantal zeer uiteenlopende elementen, waarvan geringe hoeveelheden onontbeerlijk zijn voor den opbouw en een goed functioneeren van ons lichaam.

Bertrand en McCollum, J. Biol. Chem. **77**, 753 (1928);
92, 651 (1931); **100**, 603 (1933).

J. Russell, Boden und Pflanze, 2e druk, 1936, p. 70, 76.

The first part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the work during the year. It is followed by a detailed account of the various projects and the results obtained.

The second part of the report is devoted to a description of the various projects and the results obtained. It is followed by a detailed account of the various projects and the results obtained.

The third part of the report is devoted to a description of the various projects and the results obtained. It is followed by a detailed account of the various projects and the results obtained.

The fourth part of the report is devoted to a description of the various projects and the results obtained. It is followed by a detailed account of the various projects and the results obtained.

The fifth part of the report is devoted to a description of the various projects and the results obtained. It is followed by a detailed account of the various projects and the results obtained.

The sixth part of the report is devoted to a description of the various projects and the results obtained. It is followed by a detailed account of the various projects and the results obtained.

