

Künstliche Torfbildung: Inkohlung von Sphagnummoos.

Von Prof. Dr. CARL G. SCHWALBE und Dr. KARL-ERIK NEUMANN,
Holzforschungs-Institut der Forstlichen Hochschule Eberswalde.

(Eingeg. 14. Januar 1933.)

Begriff der Inkohlung: Die Literatur über Inkohlung hat einen außerordentlichen Umfang angenommen. Das Problem hat dadurch nicht eine Klärung erfahren, sondern ist nur noch verwickelter geworden. Verschiedene Umstände führen zu diesem unerfreulichen Zustand. Zunächst hat man dem Begriff der „Inkohlung“ neuerdings verschiedene Deutungen gegeben, die er früher nicht hatte. *Franz Fischer* und seine Mitarbeiter wollen erst dann von Inkohlung reden, wenn die Bakterien und Pilze ihr Zerstörungswerk am Holz beendet haben. Sie wollen also zwischen der bakteriellen Phase und der chemischen Phase unterscheiden. Da aber die Bakterien und Pilze während ihrer Lebenstätigkeit chemische Prozesse auslösen, z. B. Säure bilden, so werden sich auch chemische Wirkungen während der Tätigkeit dieser Mikroorganismen abspielen. Die entstehenden Säuren können celluloseartiges Material zu Zuckern abbauen, und die entstandenen Zucker können in Humusstoffe umgewandelt werden. Nach *H. Bode*¹⁾ soll man erst dann von Inkohlung sprechen, wenn es sich um die gewaltsame Umwandlung von Braunkohle in Steinkohle handelt. Es scheint zweckmäßig, bei der früheren Deutung dieses Begriffes zu bleiben, wonach alle Stadien der teilweisen oder völligen Umwandlung der pflanzlichen Rohstoffe in kohleartige Produkte unter „Inkohlung“ verstanden wurden.

Ligningehalt der Pflanzenstoffe: Ein weiterer Umstand, der große Verwirrung auf dem Inkohlungsgebiet schafft, liegt darin, daß man bezüglich der Rohstoffe für die Inkohlung keine Unterschiede macht. Es wird etwa in einer Abhandlung von der Inkohlung des Holzes gesprochen, und gleichzeitig werden die Verhältnisse der Torfbildung zum Beweis herangezogen. Das ist keinesfalls zulässig, da diese Rohmaterialien außerordentlich verschieden zusammengesetzt sind. Vor etwa 20 Jahren traten jedenfalls diese Unterschiede der Zusammensetzung in der älteren Literatur deutlicher hervor. Damals wurde der Ligningehalt des Holzes zu etwa 24 bis 30% angegeben, während man für das Sphagnummoos, die charakteristische Pflanze des Hochmoores, außerordentlich geringe Werte, von 5 bis 7%, verzeichnet fand. Neuerdings sind diese Werte nun einander angenähert²⁾. Aber es scheint dies durch die Methodik der Analysen bewirkt zu sein. Der größte Teil aller Analysen auf diesem schwierigen Gebiete wird wohl nach der Hydrolysiermethode mit 72%iger Schwefelsäure oder mit überkonzentrierter Salzsäure durchgeführt. Man erhält bei dieser Methode sehr verschiedene Werte für Lignin, je nach der Ausführungsform der Bestimmungen. In neuster Zeit haben insbesondere amerikanische Autoren darauf hingewiesen, von welch außerordentlicher Bedeutung der Temperatur- und der Zeitfaktor sind³⁾. Man kann bei ein und demselben Material sehr verschiedene Ligninwerte erzielen, wenn man bei niedriger oder höherer Temperatur arbeitet oder kürzere oder längere Zeit die Säure auf das Versuchsmaterial einwirken läßt. Wenn z. B. die Mitarbeiter von *Franz*

¹⁾ Angew. Chem. 45, 388 [1932].

²⁾ Nach Angaben von *Shikita* u. *Watanabe*, Memoirs of the college of agriculture Kioto, Chemical Series Nr. 12, Mai 1932, hat Sphagnum 14,5% Lignin.

³⁾ *Geo J. Ritter*, *R. M. Seborg* u. *R. L. Mitchell*, Ind. Engin. Chem., Analyt. Ed. 4, 202 [1932]. — *C. J. Peterson*, *A. W. Walde* u. *R. M. Hixon*, ebenda 4, 216 [1932].

*Fischer*⁴⁾ in einer Arbeit über den Ligningehalt der Blätter jetzt 25 bis 49% Lignin finden, während man früher die Blätter für nahezu ligninfrei erklärt hat, so liegt dies offenbar an solchen Bestimmungsmethoden. Die sogenannten Hemicellulosen der Blätter sind anscheinend besonders empfindlich gegen die Säurewirkung. Diese hydrolysieren zu Zuckern, die hydrolysierten Zucker gehen in Huminsäure über und diese werden als Lignin bestimmt.

Inkohlung bzw. Humusbildung im Walde, im Niedermoor und im Hochmoor: Nach dem Vorgesagten erscheint es aber zweckmäßig, die Inkohlung getrennt nach den Rohstoffen zu erörtern. Bei der Inkohlung des Holzes spielen sich ganz andere Prozesse ab als bei der Inkohlung von Blattmaterial (Humusbildung) und bei der Inkohlung im Torfmoor. Im erstere Falle, bei der Inkohlung des Holzes, kann man sich vorstellen, daß in den „*Baumsämpfen*“ die Stämme zunächst zusammenstürzen und in den Teilen der Stämme, die über den Wasserspiegel hinausragen, die aeroben Mikroorganismen ihre zerstörende Tätigkeit ausüben, bis der Stamm so morsch geworden ist, daß er völlig im Sumpf versinkt, und nun an Stelle der aeroben die anaeroben Bakterien das Werk der Zerstörung fortsetzen. In ihren Lebensprozessen erzeugen sie hydrolysierende Säuren, welche, wie schon gesagt, auf dem Wege über Zucker die Bildung von Humusstoffen bewirken können. Bei den Blättern und Nadeln als Rohmaterial hat man einen im wesentlichen aerob verlaufenden Vorgang, der getrennt von der Inkohlung des Holzes behandelt werden muß, weil die Zusammensetzung der Rohstoffe erheblich verschieden von derjenigen des Holzes ist. Bei der Inkohlung des Sphagnummooses endlich liegen doch völlig verschiedene Verhältnisse gegenüber den bisher betrachteten Inkohlungsfällen vor. Bei dem außerordentlichen Wassereichtum des Hochmoores kann sich die Lebenstätigkeit aeroben Mikroorganismen — Bakterien und Pilze — nur in geringem Umfange abspielen. Die Hauptvorgänge der Zersetzung des Sphagnummooses finden in tieferen sauerstoffarmen Schichten des Wassers anaerob statt.

Die Versuche zur künstlichen Inkohlung von Pflanzenmaterial: Versuche zur künstlichen Inkohlung von Cellulose und Holz haben vor längerer Zeit *Bergius* und neustens *Berl* bei hohen Drucken und Temperaturen (etwa 300°) bewerkstelligt. Versuche zur Bildung von Steinkohle bei hohen Drucken sind auch, wie schon eingangs erwähnt, von *H. Bode* durchgeführt worden. Zuweilen mag sich die Kohlebildung so gewaltig vollzogen haben. Sicherlich gibt es aber auch viele Fälle, wo hohe Temperaturen und Drucke nicht eingewirkt haben können. In dem Bestreben, bei der künstlichen Inkohlung von hohen Temperaturen und Drucken fernzubleiben, haben *Schwalbe* und *Schepp*⁵⁾ gezeigt, daß man die Hydrolyse von Holzsubstanz mit konzentrierter Chlormagnesiumlösung durch die bei 180° sich abspaltende Salzsäure vornehmen kann, worauf in der konzentrierten Salzlösung die gebildeten Zucker in kohleartige Stoffe, zum mindesten in Humusstoffe übergehen. Zwar hat *Franz Fischer*⁶⁾ bezüglich dieser Inkohlungsversuche angegeben, daß wirkliche Kohlen nicht entstanden seien. Dies ist aber auch in den

⁴⁾ *R. Lieske* u. *K. Winzer*, Brennstoff-Chem. 12, 205 [1931].

⁵⁾ Ber. Dtsch. chem. Ges. 57, 319 [1924].

⁶⁾ Brennstoff-Chem. 5, 132 [1924].

genannten Abhandlungen nicht behauptet, sondern es ist nur von den Vorstufen der Inkohlung gesprochen worden.

Eine Verkohlung durch Chlormagnesiumlösung in der Natur könnte dann vor sich gehen, wenn eine Überflutung von Baumstümpfen mit Meerwasser und nachträgliche Verdunstung des Wassers stattgefunden hätte. Nun gibt es aber viele Fälle der Kohlebildung, bei der eine solche Überflutung mit Meerwasser nicht angenommen werden kann. Es war daher notwendig, die Arbeitshypothese der Inkohlung über die Zwischenstufen der Hydrolyse zu Zucker und Zersetzung der Zucker zu Humusstoffen unter Bedingungen zu prüfen, bei welchen andere hydrolytisch wirkende Agenzien als Salzsäure zur Anwendung kommen. Man kann hier zunächst an die Pflanzensäuren, wie z. B. Oxalsäure, Milchsäure, denken, die häufig in den Pflanzenstoffen vorkommen. Weit größer aber als das Verbreitungsgebiet dieser oder anderer Säuren, die durch die Lebenstätigkeit von Mikroorganismen gebildet werden können, ist das der Kohlensäure, die schon im frisch geschlagenen Holz nachweisbar ist und schließlich bei der Oxydation der organischen Substanz durch Luftsauerstoff entsteht.

Es ist natürlich aussichtslos, eine solch schwache Säure bei gewöhnlicher Temperatur und in den geringen Konzentrationen, in welchen sie in dem Pflanzenmaterial oder in dem Wasser, welches solche Pflanzenstoffe enthält, in der Natur vorkommt, zur künstlichen Inkohlung anzuwenden. Man muß, um ihre Reaktion zu beschleunigen, die Temperatur und den Druck erhöhen. Um den Bedingungen in der Natur möglichst nahe zu kommen, wurden die Temperatur von 100° und ein Kohlensäuredruck von 25 at gewählt und die Versuche bis zu einer Dauer von 1600 h ausgedehnt. Als Rohmaterial für solche Inkohlungsversuche diente einerseits Buchenholz, andererseits Sphagnummoos. Bei beiden Ausgangsmaterialien wurde beginnende Humusbildung beobachtet. Jedoch erwies sich das Buchenholz als wesentlich widerstandsfähiger als das Sphagnummoos, so daß abschließend über die Inkohlung von Buchenholz noch nicht berichtet werden kann, es dagegen möglich ist, über die Inkohlung von Sphagnummoos zahlenmäßige Angaben zu machen.

Bei der Vertorfung des Sphagnummooses im Hochmoor sind die Inkohlungsbedingungen wesentlich einfacher als bei der Inkohlung von Holz in einem Baumstumpf, so daß die Wahl des Sphagnummooses als Ausgangsstoff gute Aussichten auf erfolgreiche Durchführung einer Verkohlung bot.

Von dem Sphagnummoos wurden in einem Autoklaven 500 g (180 g trocken gedacht) mit 4 l Wasser durchtränkt, und nach Schließung des Autoklaven wurde durch Kohlensäuredruck aus einer Stahlflasche völlige Sättigung des Wassers mit Kohlensäure erreicht. Hierauf wurde allmählich auf 100° erhitzt, so daß die vermutete Hydrolyse sich bei 25 at Kohlensäuredruck vollziehen konnte. Der Autoklav wurde nach 500 h, 1000 h und 1600 h jeweils abgekühlt, geöffnet, und es wurden Proben entnommen, worauf wieder mit dem jeweiligen Rest des Sphagnummooses die Inkohlung fortgesetzt wurde.

Zur Untersuchung der Reaktionsprodukte wurde die humusartige Substanz verbrannt und so die Menge an Kohlenstoff und Wasserstoff festgestellt. Ferner wurde durch Ausziehen mit Kalilauge verschiedener Konzentration die Bildung alkalilöslicher Humusstoffe kontrolliert. Die Humussäurebestimmung wurde nach folgender Vorschrift durchgeführt:

Das bei 105° getrocknete Sphagnum wurde mit NaOH 4 h bei Zimmertemperatur geschüttelt, die Lösung abfiltriert und mit 5%iger Salzsäure versetzt. Nach dem Absitzen des Niederschlags wurde die überschüssige Flüssigkeit dekantiert,

der Niederschlag in der Zentrifuge abgetrennt und gewaschen. Bei der Extraktion mit 5%iger Kalilauge wurde das Sphagnum mit der Kalilauge 4 h auf dem Wasserbad erwärmt. Die Ausfällung und Abtrennung der Humussäure wurde wie oben ausgeführt.

Die Ergebnisse des Inkohlungsversuches zeigt die Zahlentafel, aus der man ersieht, daß tatsächlich durch

Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt von Sphagnummoos, frisch und bei Kohlendioxydruckerhitzung auf 100°.

(Die Kohlenstoff- und Wasserstoffwerte beziehen sich auf wasser- und aschefreie Substanz.)

	C-Gehalt	H-Gehalt
	%	%
Sphagnum, unbehandelt	47,23	6,54
" 500 h Druckerhitzung	52,41	6,18
" 1000 "	55,91	5,90
" 1600 "	56,62	5,86
Moortorf, wenig verändertes Sphagnummoos	51,1	6,0
Normaler Torf	57-59	5-6

Humussäure, extrahiert aus Sphagnum mit NaOH bei gewöhnlicher Temperatur.

	% Humussäure
Sphagnum, frisch	0,48
" 250 h Erhitzungsdauer (100°)	0,60
" 500 "	2,50
" 1000 "	8,28
" 1600 "	8,44

Humussäure, extrahiert aus Sphagnum mit 5%iger KOH bei Wasserbadtemperatur.

	% Humussäure
Sphagnum, frisch	5,91
" 250 h Erhitzungsdauer (100°)	20,94
" 500 "	35,42
" 1000 "	37,15
" 1600 "	35,50

die Kohlensäure eine Bildung von Humusstoffen erreicht werden kann. Betont muß werden, daß durch Erhitzung mit Wasser allein derartige Verkohlungen nicht zu erreichen sind. Die Werte für Kohlenstoff und Wasserstoff sind bei dem 1600 h lang erhitzten Sphagnummoos etwa denjenigen eines normalen Torfes aus 1,5 m Tiefe eines Hochmoores annähernd gleich, so daß es völlig berechtigt ist, von einer künstlichen Torfbildung zu sprechen. Die erhaltenen humusartigen Stoffe sind auch bezüglich ihrer Alkalilöslichkeit dem normalen Torf sehr ähnlich, dessen Alkalilöslichkeit zwischen 30 und 50% zu schwanken pflegt. Auffällig ist, daß nach 1000 h anscheinend die Reaktion langsamer verläuft und die Alkalilöslichkeit sich nicht mehr vergrößert. Es könnte dies daran liegen, daß die alkalilöslichen Humussäuren in alkaliumlösliche übergeführt werden. Durch Verlängerung der Erhitzungsdauer wird sich hoffentlich diese Vermutung experimentell prüfen lassen.

In der Natur könnte diese Art der Inkohlung in einem Torfmoor sehr wohl vor sich gehen, unbeschadet der Tätigkeit der Mikroorganismen, die, falls sie Säure bilden, noch zu einer Beschleunigung der Reaktion beitragen können.

Zusammenfassung: 1. Der Begriff der Inkohlung darf nicht auf chemische Umwandlung des bakteriell zersetzen Rohpflanzenmaterials begrenzt werden, weil neben bakteriellen Prozessen chemische Reaktionen einherlaufen.

2. Der Ligningehalt des Rohpflanzenmaterials läßt sich nur bei Hölzern mit der üblichen Abscheidungsmethode (mit 72%iger Schwefelsäure) annähernd bestimmen. Je nach Zeit, Temperatur und Säurestärke

werden Bestandteile des Pflanzenmaterials, insbesondere Hemicellulosen, verkohlt und die Kohle als Lignin mitbestimmt.

3. Die Bedingungen für die Umwandlung des Rohpflanzenmaterials in Humussäuren bzw. kohlenartige Substanzen sind sehr verschiedenartig im Waldboden, im Niederungsmoor (Baumsumpf) und im Hochmoor. Bei der Humusbildung im Waldboden vollziehen sich aerobe,

im Hochmoor anaerobe und im Niederungsmoor sowohl aerobe wie anaerobe Zersetzungssprozesse.

4. Die Torfbildung aus Sphagnummoos läßt sich experimentell durch Kohlensäuredruckerhitzung bei 100° und 25 at Druck binnen 1600 h nachahmen.

5. Ohne Kohlensäure als hydrolysierendes Agens tritt Inkohlung unter den genannten Bedingungen nur in sehr geringem Maße ein. [A. 2.]

VERSAMMLUNGSBERICHTE

Deutsche Chemische Gesellschaft.

Berlin, 11. Februar 1933.

Vorsitzender: Prof. A. Wohl, Danzig.

Prof. M. Born, Göttingen: „Welche Vorstellung von der chemischen Bindung vermittelt die Quantenmechanik?“¹⁾

An dem Problem der chemischen Bindung interessiert den modernen Physiker, ob das Absättigungsphänomen quantenmechanisch zu verstehen ist. Die Begründer einer quantenmechanischen Theorie der Valenz sind W. Heilker und F. London. Der Grundgleichung der Planckschen Quantentheorie $E = h\nu$ (E = Energie, h = Plancksches Wirkungsquant, ν = Frequenz) entspricht in der *de Broglieschen* Wellenmechanik, in der jedem Masseteilchen eine Welle zugeordnet ist, die Gleichung $p = h\nu$ (p = Frequenz, h = Plancksches Wirkungsquant, ν = Wellenzahl; $\nu = 1/\lambda$; λ = Wellenlänge). Die Gültigkeit einer solchen Gleichung war in der klassischen Theorie unbekannt, trotzdem sie ein Analogon in einem einfachen groben Pendelversuch hat. Nimmt man nämlich an einem schwingenden Pendel während der Schwingung praktisch eine Änderung vor, indem man z. B. den Faden des Pendels allmählich verkürzt, so ändern sich die Amplituden der Pendelschwingung nicht kontinuierlich, sondern in ganz bestimmter Abhängigkeit mit der Frequenz. Der experimentelle Nachweis der von der Wellenmechanik postulierten Wellennatur der Materie ist zuerst durch Versuche von Davisson und Germer über Reflexion von Elektronen an Metallen erbracht worden; die Ergebnisse sind nur als Beugung von Wellen am Gitter zu deuten. Zum selben Ergebnis führten die Untersuchungen der Beugung von Elektronenstrahlen an Metall- und Glimmerfolien von G. P. Thomson²⁾, Rupp u. a. — In der Quantentheorie ist jedes Teilchen durch Energie und Impuls charakterisiert, die als seine Quantenzahlen anzusprechen sind. Diese unterliegen dem Pauli-Prinzip, das besagt, daß niemals zwei Teilchen eines Systems genau dieselben Quantenzahlen haben dürfen. Aus diesem Gesetz ergibt sich z. B. die Existenz der Nullpunktsenergie der Elektronen, denn auch bei tiefster Temperatur füllen die freien Elektronen der Metalle, die sich wie ein entartetes Gas verhalten, einen ganzen Energiebereich aus, was mit Hilfe der Thermoelektrizität direkt nachweisbar ist.

Schon vor der Entdeckung der Wellennatur der Materie führte die Bohrsche Deutung der Linienspektren zu einer provisorischen Atommechanik. Nach Bohr bewegt sich ein Elektron auf einer stationären Bahn um den Atomkern. Als Quantenbedingung ergab sich, daß der Drehimpuls ganzzahlig ist. Nach der Quantenmechanik läuft eine beinahe ebene Welle um den Kern; damit die Welle sich auf der Bahn schließen kann, muß ebenfalls der Drehimpuls ganzzahlig sein. Nach Schrödinger hat man sich das Elektron als schwingende Gittere vorzustellen, es wird in Analogie mit akustischen Schwingungen durch drei Arten von Knotenlinien, entsprechend drei Quantenzahlen, charakterisiert: durch die radiale Quantenzahl $n = 1, 2, 3, \dots$, die azimutale Quantenzahl $l = 0, 1, 2, \dots n - 1$, die magnetische Quantenzahl $m = -l, -l + 1, \dots +l$. Die Grobstruktur der Linienspektren der Atome ließ sich schon nach Bohr deuten. Daß jedoch die Linien der Hauptserie der Alkalimetalle, z. B. die gelbe D-Linie des Natriums, doppelt, also noch in zwei Linien aufspaltbar sind, ist weder vom Standpunkt der Bohrschen Theorie noch von dem der bisher ent-

wickelten Wellentheorie zu erklären. Eine Deutung dafür gelang Uhlenbeck und Goudsmit dadurch, daß sie dem Elektron sowohl ein mechanisches als auch ein magnetisches Moment, was im englischen Wort „Spin“ zusammengefaßt wird, zuschreiben. Man hat sich demnach das Elektron als einen magnetischen Kreisel vorzustellen. Das Spinnmoment s ist ein Vektor mit zwei Komponenten. $s = +1/2$ oder $s = -1/2$, je nachdem, ob in einem äußeren Feld Einstellung der Komponenten in der Feldrichtung oder entgegengesetzt dazu stattfindet. Außer den bereits genannten Quantenzahlen n, l und m kommt demnach dem Elektron noch die 4. Quantenzahl s zu, die $+1/2$ oder $-1/2$ sein kann. Das Pauli-Prinzip verbietet, daß für zwei Elektronen eines Atoms alle vier Quantenzahlen gleich sind. Dementsprechend gibt es für Orthohelium keinen Grundzustand ($l = 0$), weil dann in Ortho- und Parahelium alle Quantenzahlen der beiden Elektronen gleich wären. Mit Hilfe der Quantenzahlen und des Pauli-Verbotes läßt sich das periodische System der Elemente vollständig aufbauen. Für $n = 1$ gibt es nach den oben genannten Bedingungen für die Quantenzahlen zwei Möglichkeiten: $l = 0, m = 0, s = +1/2$ oder $l = 0, m = 0, s = -1/2$. Hiermit ist die innerste Schale, die sog. K-Schale, abgeschlossen. Wenn ein drittes Elektron hinzukommt, muß dafür eine äußere Schale, die L-Schale, angebaut werden. In dieser befinden sich die Elektronen, deren $n = 2$ ist; darin sind acht Elektronen möglich, zwei mit $l = 0; m = 0, s = +1/2$ bzw. $-1/2$, und sechs Elektronen mit $l = 1 (m = -1, 0, 1; s = +1/2$ bzw. $-1/2$). Man erhält also zwei Unterschalen in der L-Schale. Baut man weiter ein Elektron an, so muß es in die M-Schale gehen ($n = 3$); in dieser Schale können zwei Elektronen mit $l = 0, m = 0, s = +1/2$ bzw. $-1/2$, sechs Elektronen mit $l = 1, m = -1, 0, 1$ und $s = +1/2$, bzw. $-1/2$, und zehn Elektronen mit $l = 2, m = -2, -1, 0, 1, 2, s = +1/2$ bzw. $-1/2$, also insgesamt achtzehn Elektronen sein, dann ist die Schale abgeschlossen. Die Anzahl der Elektronen, die in einer abgeschlossenen Schale möglich sind, ergeben die Länge der Perioden im natürlichen System der Elemente. Die Edelgase haben im periodischen System gerade die Plätze inne, wo die Schalen abgeschlossen sind.

Analog wie die Atome lassen sich die Moleküle aufbauen. Diese sind Systeme, die im einfachsten Fall aus zwei Kernen bestehen. Je nachdem, ob das Molekül am leichtesten in Atome oder in Ionen zerfällt, unterscheidet man Atombindung oder Ionenbindung. Die Ionenbindung ist auch ohne Quantenmechanik fast vollständig zu verstehen. Die quantenmechanischen Valenztheorien beschäftigen sich daher mit der Atombindung. Bei dieser hat man zu unterscheiden 1. die eigentliche Valenzabsättigung, 2. die van der Waalssche Kohäsion, die ebenfalls zur Molekülbildung führen kann (z. B. K_2 , verflüssigtes Helium), und 3. Bindungen, wie sie im Diamant, im Benzolring u. a. vorliegen. Die Theorien beziehen sich vornehmlich auf die erste Art. Unter der Voraussetzung, daß die Bindung (Valenzabsättigung) zwischen zwei Kernen durch ein Elektronenpaar erfolgt, haben Heilker und London eine quantenmechanische Theorie der Valenz entwickelt, während Hund³⁾, Herzberg⁴⁾ und Mulliken eine Einelektronentheorie aufgestellt haben. Zu quantitativen Ergebnissen hat bisher nur die Elektronenpaartheorie von Heilker und London geführt. Bei der Bildung eines Moleküls aus zwei Atomen ist danach als wesentlicher Faktor die Wechselwirkung zwischen zwei zu zwei Atomen gehörigen Elektronen zu berücksichtigen. Diese verhalten sich wie zwei miteinander gekoppelte Pendel, die entweder symmetrisch (in Gegenphase) oder antisymmetrisch (in Phase) schwingen können. Die antisymmetrische Pendel-

¹⁾ Vgl. dazu auch Born, „Theorie der homöopolaren Valenz bei mehratomigen Molekülen“, diese Ztschr. 43, 6 [1932].

²⁾ Vgl. diese Ztschr. 45, 91 [1932].

³⁾ Vgl. diese Ztschr. 43, 115 [1930].

⁴⁾ Vgl. diese Ztschr. 44, 686 [1931].