II. *Electrische Eigenschaften des Quarzes;* *von W. C. Röntgen.*

(Fortsetzung.)¹⁾

Bei Gelegenheit einer Untersuchung der elastischen Eigenschaften des Quarzes wurde ich durch gewisse, hier nicht näher zu besprechende Erscheinungen veranlasst, zu versuchen, ob Electricität in regelmässiger Weise erzeugt wird, wenn ein cylindrisches Quarzstäbchen, dessen Axe parallel der Hauptaxe ist, tordirt wird.

Ich bestellte zu diesem Zwecke bei Herren Dr. Steeg und Reuter ein aus einem rechtsdrehenden, einfachen und nicht verwachsenen Krystall geschnittenes Stäbchen. Dasselbe ist 9 cm lang, ziemlich genau kreisrund und ungefähr 0,71 cm dick; die optische Untersuchung ergab, dass die Cylinderaxe jedenfalls nicht viel von der optischen Axe abweicht, und liess keine Zwillingsbildung erkennen.

Zunächst wurden in verschiedener Höhe des Cylinders in der früher von mir angegebenen Weise die je 6 Stellen fehlender Piezoelectricität aufgesucht und durch schwarze Punkte auf dem Stab markirt.

Ich fand, dass diese Punkte alle sehr regelmässig auf der Cylinderfläche vertheilt waren; daraus ist zu schliessen, dass der Krystall keine oder nur sehr geringe Verwachsungen enthält.

Beide Enden des Stäbchens wurden dann mittelst Siegelack in Messingfassungen eingekittet, durch welche das Stäbchen mit der Torsionsvorrichtung verbunden wurde. Diese Verbindung ist derart, dass das eine Ende des Stäbchens unverrückbar mit dem drehbaren Torsionskopf und das andere nur dann mit dem übrigen Theil des Torsionsapparates fest verbunden ist, wenn eine am Apparat befindliche Schraube angezogen wird. Bei gelöster Schraube kann man das Stäbchen mit dem Torsions-

1) Vgl. Röntgen, Wied. Ann. 18. p. 213. 534; 19. p. 319. 513. 1883.

kopf um seine Axe frei drehen, ohne dass dasselbe dabei eine Torsion erleidet. Diese Einrichtung ist nöthig, um verschiedene Stellen der Cylinderfläche, die auf eine Electrisirung durch Torsion geprüft werden sollen, dem zum Electrometer führenden Prüfungsdraht gegenüber stellen zu können.

Der Prüfungsdraht besteht aus einem circa 55 cm langen, 0,07 cm dicken, geraden Kupferdraht, der gut isolirt, parallel der Cylinderaxe, dem Stäbchen möglichst nahe, aber ohne dasselbe zu berühren, fest aufgestellt ist; von seiner Mitte aus führt ein Draht zu einem Hankel'schen Electrometer.

Um die Lage der durch Torsion entstehenden electrischen Zonen in Bezug auf die Richtungen der Axen fehlender Piezoelectricität angeben zu können, befestigte ich an einer der beiden genannten Messingfassungen möglichst concentrisch mit der Cylinderaxe einen von 5 zu 5 Graden getheilten Theilkreis. Beim Drehen des Stäbchens um seine Axe drehte sich dieser Theilkreis mit und die Grösse der Drehung konnte mittelst eines feststehenden Index abgelesen werden.

Die Lage der Axen fehlender Piezoelectricität bestimmte ich, indem ich die erwähnten schwarzen Punkte der Reihe nach unter den Prüfungsdraht brachte und die zugehörigen Stellungen des Index am Theilkreis ablas. So erhielt ich z. B. in einem Fall folgende Ablesungen:

215°	155°	97°	38°	335°	275°	215°
+	-	+	-	+	-	

Die Differenz von zwei aufeinander folgenden Werthen beträgt nicht immer genau 60°, wie es eigentlich der Fall sein sollte; wenn man aber bedenkt, dass der Durchmesser des Stäbchens nur 0,71 cm beträgt, dass der Theilkreis sicher nicht genau centrisc aufgesetzt war, und dass auch die Drehungsaxe kaum ganz genau mit der Cylinderaxe zusammenfiel, so werden die vorkommenden kleinen Abweichungen nicht befremden. Die in der zweiten Reihe enthaltenen + und - Zeichen geben die Art der Piezoelectricität an, welche bei Druckzunahme an den zwischen den Axen fehlender Piezoelectricität gelegenen Stellen entsteht.

Die Torsionsversuche ergaben nun Folgendes: Electricität entsteht im Augenblick, wo die Torsion anfängt; die Electrisirung nimmt an Stärke zu, wenn die Torsion vermehrt wird, und bleibt constant, wenn die Torsion unverändert bleibt. Lässt man mit der Torsion nach, so entsteht sofort die entgegengesetzte Electricität von vorhin, und ist das Stäbchen wieder in den untordirten Zustand zurückgekehrt, so ist auch alle Electricität verschwunden. Eine Torsion in der entgegengesetzten Richtung erzeugt ebenfalls, und zwar in derselben Weise Electricität, nur ist dieselbe gleichnamig mit der, welche vorhin bei der Abnahme der Torsion auftrat. Die Art der an einer Stelle des Cylinders auftretenden Electricität ist somit abhängig erstens von der Richtung der Torsion und zweitens davon, ob eine Torsion in bestimmter Richtung zu- oder abnimmt.

Wendet man bei einem späteren Versuch anstatt eines längeren, der Cylinderaxe parallelen Prüfungsdrahtes eine gegen das Stäbchen senkrecht gerichtete Spitze an, so kann man nachweisen, dass dieselben Verhältnisse bezüglich der Art und der Stärke der entstehenden Electricität vorhanden sind an allen Orten der Cylinderfläche, welche in einer mit der Axe parallelen Geraden liegen.

Verschiedene Verhältnisse findet man aber, wenn man der Reihe nach verschiedene im Kreise um den Cylinder herum gelegene Stellen untersucht. Dann findet man, dass bei Zunahme einer stets gleichgerichteten Torsion an verschiedenen Stellen verschiedene Electricitäten entstehen, und zwar ergibt sich, dass ein Wechsel in der Electricitätsart eintritt, wenn man vier um ungefähr 90° voneinander gelegene Punkte dieses Kreises überschreitet; an diesen vier Stellen erhält man somit durch eine Torsion, sei dieselbe gerichtet, wie sie wolle, keine Ausschläge des Electrometers. Denkt man sich durch diese Stellen und die Cylinderaxe Ebenen gelegt, so theilen dieselben die Mantelflächen in vier ungefähr gleich grosse Zonen, von denen jede in ihrer ganzen Ausdehnung gleichnamig electrisch wird;¹⁾ je zwei aneinander stossende Zonen werden aber immer ver-

1) Der Kürze halber wähle ich diesen Ausdruck, ohne damit die Ansicht aussprechen zu wollen, dass die Electricität bloß an der Oberfläche

schieden electrisch, die eine positiv, die andere negativ. Die Lage dieser vier Ebenen fehlender Torsionselectricität, wie ich sie nennen möchte, fand ich mit Hülfe des erwähnten Theilkreises bei:

$$\begin{array}{ccccccccc} 235^{\circ} & & 156^{\circ} & & 63^{\circ} & & 336^{\circ} & & 235^{\circ} \\ & & - & & + & & - & & + \end{array}$$

Die + und – Zeichen geben wieder die Art der entstehenden Electricität an, und zwar der bei Zunahme derjenigen Torsion entstehenden, durch welche die ursprünglich der Cylinderaxe parallelen Fasern zu Linksschraubenlinien gebogen werden. Wie diese Zeichen sich ändern, wenn die Torsion sich ändert, ist oben angegeben.

Zwei dieser vier Ebenen fallen zusammen (156° und 336°), die dritte (63°) weicht um 3° , die vierte um 11° von einer zu den beiden ersten senkrechten Ebene ab. Sieht man von diesen Abweichungen ab, so kann man sagen, dass die Ebenen fehlender Torsionselectricität zwei zueinander senkrechte, die Cylinderaxe, folglich auch die optische Axe enthaltende Ebenen sind.

Vergleicht man die Lage dieser Ebenen mit der Lage der Ebenen fehlender Piezoelectricität, so ergibt sich, dass eine Ebene fehlender Torsionselectricität mit einer ganz bestimmten Ebene fehlender Piezoelectricität zusammenfällt, während die andere in der Mitte der beiden übrigen Ebenen fehlender Piezoelectricität liegt und somit eine Axe maximaler Piezoelectricität enthält. Oder, indem man die Lage der Ebenen auf die krystallographischen Axen bezieht: eine Ebene fehlender Torsionselectricität enthält eine ganz bestimmte Zwischenaxe, die andere die zu dieser Zwischenaxe senkrecht stehende Nebenaxe des Krystalls.

Ich muss bekennen, dass mir anfänglich dieses Resultat sehr unwahrscheinlich vorkam, und ich habe mich demselben lange ungläubig gegenüber verhalten; als ich dasselbe aber immer wieder bestätigt fand, nicht nur bei demselben unter verschiedenen Versuchsbedingungen untersuchten Stäbchen, sondern auch, wie unten ausführlicher mitgetheilt werden soll, an einem zweiten Exemplar, da konnte ich an der Rich-

des Cylinders entsteht; wo dieselbe entsteht, lässt sich nicht entscheiden.

tigkeit der gefundenen Thatsache nicht mehr zweifeln: ich habe die früher, wie ich glaube, allgemein getheilte Ansicht, dass keine der drei Nebenaxen, resp. der drei Zwischenaxen des Quarzes in irgend einer Beziehung vor den anderen ausgezeichnet sei, aufgeben müssen. Diese Regel der Gleichwerthigkeit der Axen muss eine Einschränkung erfahren, denn sie gilt nicht mehr für das electricische Verhalten des Quarzes bei einer Torsion um seine Hauptaxe.

Vielleicht, ich möchte sogar sagen wahrscheinlich, wird sich bei späteren Untersuchungen herausstellen, dass die drei genannten Axen auch noch in anderer Beziehung nicht gleichwerthig sind. Andeutungen einer solchen Ungleichwerthigkeit habe ich schon beim Betrachten von Quarzkrystallen zu finden geglaubt, indessen sind meine Erfahrungen auf diesem Gebiet viel zu gering, um auf diese Beobachtung jetzt schon Gewicht legen zu dürfen.

In Fig. 1 ist die Lage der beobachteten Stellen wiedergegeben, und zwar mit Vernachlässigung der besprochenen Abweichungen. Der Kreis stellt einen Querschnitt des Stäbchens dar,

Fig. 1.

einen Querschnitt des Stäbchens dar, die drei punktirten Linien die Axen fehlender Piezoelectricität und die + und - Zeichen innerhalb des Kreises die durch Druckzunahme entstehende Piezoelectricität. Die ausserhalb des Kreises liegenden kurzen radialen Striche geben die Lage der Ebenen fehlender Torsions-

electricität und die von kleinen Kreisen umschlossenen + und - Zeichen die Art dieser Electricität an. (Vgl. vorige Seite).

Die Befürchtung, dass ein Zufall im Spiel sein könnte, veranlasste mich, ein zweites Stäbchen zu bestellen. Dasselbe ist 10 cm lang, ungefähr 0,76 cm dick und absichtlich aus einem linksdrehenden Krystall geschnitten. Bezüglich der Lage der optischen Axe, der Homogenität etc. gilt dasselbe, was oben von dem ersten gesagt wurde.

Ich fand die Axen fehlender Piezoelectricität bei:

308°	245°	188°	128°	69°	7°	308
+	-	+	-	+	-	

und die Ebenen fehlender Torsionselectricität bei:

312°	218°	133°	40°	312°
—	+	—	+	

Die + und — Zeichen haben dieselbe Bedeutung, wie oben.

Vernachlässigt man wieder die jetzt höchstens 5° betragenden Abweichungen und fertigt eine Zeichnung der gefundenen Verhältnisse an, so ergibt sich die Fig. 2. Aus derselben erkennt man sofort, dass das zweite Stäbchen dieselben Resultate liefert, wie das erste.

Dass Fig. 2 ein Spiegelbild von Fig. 1 ist, hängt nicht, wie man vielleicht vermuthen könnte, ohne weiteres damit zusammen, dass das erste Stäbchen aus einem rechts-, das zweite aus einem linksdrehenden Krystall geschnitten ist; denn eine kurze Ueberlegung zeigt, dass man zwei vollständig congruente Figuren erhalten hätte, wenn das eine der beiden Stäbchen mit vertauschten Enden, also in umgekehrter Lage, untersucht und die Vertheilung der Electricitäten für diesen Fall gezeichnet worden wäre.

Fig. 2.

Sucht man zwei verschieden drehende Quarzkrystalle so zueinander zu stellen, dass dieselben in krystallographischer, folglich auch in piezoelectrischer Beziehung sich wie zwei Spiegelbilder zueinander verhalten, so erreicht man dieses in 6 Stellungen, vorausgesetzt, dass der eine Krystall festgehalten, der andere bloß gedreht und nicht von seinem Orte entfernt wird. Würde man verlangen, dass auch die Vertheilungen der durch gleichgerichtete Torsion entstandenen Electricitäten auf beiden Krystallen sich wie Spiegelbilder zu einander verhalten, so bliebe von den 6 Stellungen nur noch eine als möglich übrig; und das hätte zur Folge, dass man der Hauptaxe des Quarzes polare Eigenschaften zuschreiben müsste. Eine Polarität dieser Axe ist meines Wissens bis jetzt noch nicht direct nachgewiesen worden; ich halte es aber für wahrscheinlich, dass dieselbe besteht. Meine anfänglich gehegte Hoffnung, dass eine Torsion des Stäb-

chens seine Axe polar electrisch machen würde, hat sich nicht erfüllt.

Eine weitere Bestätigung der oben mitgetheilten Resultate würde sich ergeben, wenn es gelänge, nachzuweisen, dass die Quarzstäbe um ihre Axe eine Torsion erleiden, wenn man der Oberfläche in richtiger Vertheilung Electricität zuführt. Wie man diese Vertheilung einzurichten hätte, ist leicht einzusehen; von den vier Zonen müsste die erste und die dritte etwa mit positiver, die zweite und vierte mit negativer Electricität versehen werden; die dadurch hervorgebrachte Torsion müsste dann so gerichtet sein, dass eine auf mechanischem Wege zu Stande gebrachte, gleichgerichtete Torsion die der vorhandenen entgegengesetzte Electricisirung erzeugen würde.

Ich habe diese Versuche gemacht und gefunden, dass die Stäbe sich in der That unter dem Einfluss einer Oberflächenladung tordiren.

Der Versuch wurde in folgender Weise angestellt: Um die Drehung möglichst gross zu erhalten, wurden beide Stäbe mit etwas Siegelack zu einem längeren Stab zusammenge kittet; bei diesem Zusammensetzen wurde natürlich darauf Acht gegeben, dass die entsprechenden Zonen beider Stäbe möglichst genau übereinander zu liegen kamen. Die Mitte jeder der vier Zonen wurde fast auf der ganzen Länge des Cylinders mit einem schmalen Stanniolstreifen beklebt, und die einander diametral gegenüber liegenden Streifen unter einander metallisch verbunden. Auf das eine Ende des Doppelstabes wurde sodann ein Spiegel gekittet und das andere Ende in eine Hartgummifassung gesteckt, in welcher die von den beiden Polen einer Holtz'schen Electrisirmaschine kommenden Zuleitungsdrähte eingesetzt waren; je ein Draht war mit einem Stanniolstreifenpaar leitend verbunden. Die Hartgummifassung diente gleichzeitig als Fuss für den vertical aufgestellten Stab. Dem Spiegel gegenüber stand in ungefähr 3 m Entfernung ein Fernrohr mit horizontaler Scala; ein Beobachter befand sich beim Versuch an diesem Fernrohr, während ein Gehülfe die Holtz'sche Maschine drehte, und zwar zunächst mit in sich geschlossenem

Conductor. Sollte das Stäbchen electrirt werden, so wurden die Kugeln an der Maschine rasch auseinander gezogen und zum Entladen des Stäbchens wurde der Conductor wieder geschlossen. Sehr grosse Potentialdifferenzen konnte ich natürlich nicht anwenden; die Grenze war durch die kleine Entfernung der Stanniolstreifen voneinander gegeben: Im Maximum durfte ich eine Potentialdifferenz erreichen, welche zwischen Kugeln von 2 cm Durchmesser einen Funken von 0,1 cm Länge erzeugte.

Dieselbe genügte aber vollständig, um eine wahrnehmbare Torsion des Quarzes zu Stande zu bringen. Der Beobachter am Fernrohr sah sowohl im Augenblick der Electrisirung als auch der Entladung die Scala sich deutlich um einen Bruchtheil eines Millimeters ruckweise verschieben. Die Richtung dieser Verschiebungen änderte sich, wenn mittelst eines Commutators die Electrisirung der Stanniolstreifen gewechselt wurde, dieselbe stimmte aber in allen Fällen überein mit der, welche nach der oben mitgetheilten Ueberlegung zu erwarten war.

Ich habe diese Versuche häufig wiederholt und in verschiedener Weise variirt; untersuchte auch jeden Stab für sich allein und liess die Fernrohrbeobachtungen von einem anderen Beobachter wiederholen, der über die zu erwartende Richtung der Torsion vorher gar nicht orientirt sein konnte. Es ergab sich aber stets ohne Ausnahme dasselbe Resultat. Ich verzichtete deshalb darauf die durch Electrisirung entstehende Torsion noch in anderer Weise nachzuweisen; es gibt ja noch verschiedene Mittel, sowohl optische als electrische und schliesslich auch wohl akustische. Von allen diesen Mitteln schien mir das angewendete das einwurfsfreieste zu sein.

Von der Art und Weise, wie die Torsionselectricität und die Torsion durch Electrisirung zu Stande kommt, habe ich mir noch keine rechte Vorstellung machen können; die Annahme einer Polarität der Molecüle, von der ich ja ursprünglich beim Beginn meiner electrooptischen und piezoelectrischen Versuche ausging, führte nicht zum Ziel. Ich möchte bei dieser Gelegenheit nochmals hervorheben, dass

die Torsion entstand, als Electricität den fest mit dem Stabe verbundenen (aufgeleimten) Stanniolstreifen zugeführt wurde.

Schliesslich habe ich noch untersuchen wollen, wie das optische Verhalten der Quarzcyylinder im polarisirten Licht durch Electrisirung der mehrfach genannten vier Zonen geändert wird. Die Untersuchung wurde durch den Umstand sehr erschwert, dass die Drehung der Polarisationssebene in den langen Stäben so beträchtlich ist, dass man den Analysator auch unter Anwendung von Natriumlicht nicht mehr auf Dunkel einstellen konnte. Ich habe deshalb nicht mit Gewissheit entscheiden können, ob eine Aenderung der Drehung durch die Electrisirung stattfand; so viel ist aber sicher, dass eine kleine Aenderung im Gesichtsfeld im Augenblick der Ladung, resp. der Entladung entstand, die mir eine Folge der geänderten Drehung zu sein schien.

Würzburg, Phys. Inst. November 1889.