(Clark University, Worcester Mass. U.S.A.)

E. ter Kuile's Theorie des Hörens.

Von

Max Meyer.

(Mit 4 Textfiguren.)

E. ter Kuile hat in diesem Archiv (Bd. 79 S. 484—509) eine Theorie des Hörens veröffentlicht, die — soweit sie mir richtig erscheint — in allem Wesentlichen übereinstimmt mit dem, was ich selber bereits vor zwei Jahren über die Function des Gehörorgans ausgesprochen habe¹⁾. Ich bedauere, dass meine hierher gehörenden Arbeiten Herrn E. ter Kuile bis zur Zeit der Publication seiner Abhandlung gänzlich unbekannt geblieben sind. Andererseits jedoch kann es mir — soweit wir übereinstimmen — nur eine Freude sein, zu sehen, dass ein anderer Forscher ganz unabhängig zu derselben Ansicht gekommen ist wie ich selber. Dies ist ein gutes Zeichen für die Richtigkeit unserer gemeinsamen Ueberzeugung. Während E. ter Kuile im Grundprincip mit mir übereinstimmt, weicht er freilich in der weiteren Durchführung des Principis von mir erheblich ab. Hier nun ist E. ter Kuile offenbar auf einen falschen Weg gerathen, wie ich im Folgenden zeigen werde, während ich selber mich auf dem richtigen, oder wenigstens dem richtigeren, zu befinden glaube.

1. Durchführung von E. ter Kuile's und meiner Theorie bei einer speciellen Schwingungsbewegung des Steigbügels.

Die Uebereinstimmung zwischen E. ter Kuile und mir besteht darin, dass wir beide annehmen, dass der Steigbügel am Anfange seiner Bewegung keine andere Wirkung hervorruft als eine Ausbuchtung der die scala vestibuli und scala tympani trennenden

1) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane Bd. 16 S. 22—34. 1898.

Zwischenwand in der Nähe des runden Fensters. Die Frage ist nun: Was geschieht, wenn der Steigbügel seine Bewegung in derselben Richtung fortsetzt?

Hier bestehen zwei Möglichkeiten, die ich mit *A* und *B* bezeichnen will. Entweder man nimmt an:

A. α. Die Tiefe der Ausbuchtung ist — wegen β — proportional der Geschwindigkeit, die der Steigbügel im betreffenden Zeitmomente hat. Eine Beschränkung der Tiefe der Ausbuchtung besteht nicht.

β . Die vom Steigbügel am Anfange der Zwischenwand hervorgerufene Ausbuchtung pflanzt sich in Folge der Elasticität der Zwischenwand mit nicht unbeträchtlicher Geschwindigkeit nach der Spitze der Schnecke zu fort; oder:

B. α. Die Tiefe der Ausbuchtung der Zwischenwand ist dadurch beschränkt, dass die Gewebe der Zwischenwand, nach Erreichung einer gewissen Maximaltiefe, der weiteren Ausbuchtung einen unter normalen Verhältnissen unüberwindlichen Widerstand entgegensetzen.

β . Die Elasticität der Zwischenwand ist so gering, und ihre Masse, vermehrt um das Gewicht der in der Ausbuchtung enthaltenen Lymphmenge, verhältnissmässig so gross, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Ausbuchtung theoretisch als verschwindend klein betrachtet werden kann. Wir haben also nur erzwungene Schwingungen in der Schnecke, keinerlei Eigenschwingungen.

Die Annahmen *Aα* und *Bα* scheinen mir an Wahrscheinlichkeit kaum etwas vor einander voraus zu haben. Wir wissen über diese Verhältnisse so wenig, dass a priori die eine Annahme ebenso berechtigt ist wie die andere. Dagegen scheint mir die Annahme *Bβ* vom anatomischen Standpunkt aus eine überwältigend grössere Wahrscheinlichkeit zu haben als die Annahme *Aβ*.

E. ter Kuile macht die Annahmen unter *A* zur Grundlage seiner Theorie, während ich die Annahmen unter *B* zur Grundlage meiner Theorie gemacht habe (in der erwähnten Abhandlung von mir S. 23). Wir werden nun die Consequenzen von *A* sowohl wie von *B* an einem speciellen Falle zu prüfen haben, wobei wir sehen werden,

dass zwar die Annahmen B, nicht aber die Annahmen A zur Uebereinstimmung der Theorie mit der Erfahrung führen, dass ich also — auch abgesehen von der grösseren anatomischen Wahrscheinlichkeit von $B\beta$ im Vergleich zu $A\beta$ — meine guten Gründe hatte, mich für die Annahmen unter B zu entscheiden. Der Unterschied ist, dass ich selber von den Thatsachen des Hörens ausgegangen bin und untersucht habe, welche mechanischen Vorgänge mit diesen Thatsachen übereinstimmen, während E. ter Kuile (wie fast alle Uebrigen, die neuerdings Theorien des Hörens aufgestellt haben) zunächst, ganz unabhängig von den Thatsachen des Hörens, eine mechanische Theorie aufstellt und dann nur hinterher einige Andeutungen macht über die Möglichkeit der Anwendung dieser mechanischen Theorie auf die physiologisch-psychologischen Thatsachen.

Zunächst will ich die physiologischen Vorgänge gegenüberstellen, durch die nach der Theorie von E. ter Kuile und nach meiner Theorie die Tonhöhe einer Tonempfindung bestimmt wird.

E. ter Kuile betont S. 505, dass nach seiner Theorie die empfundene Tonhöhe ganz unabhängig ist von der Frequenzzahl, mit der die sensiblen Nervenzellen erschüttert werden. Nach E. ter Kuile ist die Tonhöhe, die man empfindet, abhängig von der Länge der Strecke, über die sich die Ausbuchtung fortgepflanzt, oder mit anderen Worten, von der specifischen Energie der letzten von der Ausbuchtung berührten sensiblen Zelle¹⁾. Nur insofern ist die Frequenz von Bedeutung, als die Endzellen mehrerer Abschnitte in einer gewissen Weise „markirt“ sind, wenn

1) E. ter Kuile schliesst hieran auf Seite 506 die folgende Bemerkung, die ich nicht unwidersprochen lassen kann. „Auch kann ich mir keinen Nutzen denken von der phylogenetischen Bildung des Schneckenkanals, wenn wir einer jeder Hörzelle die Fähigkeit zuschreiben, jede beliebige Frequenz als eine bestimmte Qualität zu empfinden. Wir könnten dann mit einem primitiven Gehörorgan die grössten Musici sein.“ Nun, ich selber schreibe in der That jeder Hörzelle die Fähigkeit zu, jede beliebige Frequenz als eine bestimmte Qualität zu empfinden, und erblicke trotzdem einen immensen Nutzen in der phylogenetischen Bildung des Schneckenkanals. Um ein „grosser Musicus“ zu sein, dazu ist nicht nur nothwendig die Fähigkeit, überhaupt verschiedene Tonhöhen zu empfinden. Das könnten wir freilich auch mit einem primitiven Gehörorgan. Aber — was für den Musiker überaus wichtig ist — um eine ganze Anzahl von Tonhöhen gleichzeitig empfinden zu können, dazu ist (nach meiner Theorie) die phylogenetische Entwicklung des Schneckenkanals allerdings nothwendig.

solche Abschnitte bestehen, innerhalb deren die Erschütterungsfrequenz verschieden ist. In solchem Falle werden nach E. ter Kuile gleichzeitig diejenigen Tonhöhen gehört, die den Endzellen der „markirten“ Abschnitte entsprechen, „wenn auch auf diese Markirung die Aufmerksamkeit gelenkt ist“.

Nach meiner Theorie ist die empfundene Tonhöhe abhängig von der Frequenz, in der eine sensible Zelle erschüttert wird.

Wir stimmen darin überein, dass man theoretisch als Anfangszustand der Zwischenwand betrachten kann diejenige Lage der Zwischenwand, die besteht, wenn der Steigbügel sich in der (im speciellen Fall) grösstmöglichen Entfernung vom Inneren des Vestibulums befindet; diese Lage wird dargestellt durch das tiefste

Fig. 1.

Minimum der Curve, durch die man die Bewegung des Steigbügels beschreibt. Alle unsere Curven im Folgenden stellen Bewegungen des Steigbügels dar, nicht etwa Bewegungen von Lufttheilchen, worauf ich im Abschnitt 3c noch zurückkomme.

A. Die Curven in Figur 1 stellen Steigbügelbewegungen in bestimmten Fällen dar. Die dritte Curve ist die Summe zweier Sinusschwingungen im Quintenintervall; und zwar ist diese Curve gewonnen einfach durch Superposition der Curven I und II. Das Phasenverhältniss ist bestimmt durch Formel $f(x) = \cos(\pi + 2x) + \cos(\pi + 3x)$. Dies Phasenverhältniss ist natürlich ganz willkürlich, da in Wirklichkeit alle möglichen Phasenunterschiede vorkommen können. Wir müssen jedoch hier ein specielles Phasenverhältniss wählen. Wer will, kann sich leicht überzeugen, dass unsere folgenden Betrachtungen auch für andere Phasenunterschiede

richtig bleiben. Alle drei Curven lassen wir der Bequemlichkeit wegen beginnen (und endigen) mit einem absoluten Minimum.

Die ganze betrachtete Zeit nennen wir T . Die Zeiten, in denen der Steigbügel Maximum- und Minimumstellen erreicht, sind sehr leicht zu bestimmen bei den Curven *I* und *II*, die einfache Sinusschwingungen darstellen. Für die Curve *III* habe ich die Zeiten der Maxima und Minima unter Annäherung bis auf drei Decimalen berechnet. Wie man das macht, brauche ich hier nicht zu sagen,

Fig. 2.

da es eine ganz elementare mathematische Aufgabe ist. Die Werthe von a , b u. s. w. sind die folgenden:

$$\begin{aligned} a &= 0,191 T, & b &= 0,372 T, & c &= 0,500 T, \\ d &= 0,628 T, & e &= 0,809 T, & f &= 0,924 T. \end{aligned}$$

In Figur 2 sehen wir die Vorgänge dargestellt, die sich innerhalb der Zeit 0 bis T auf der die scala tympani von der scala vestibuli trennenden Zwischenwand nach E. ter Kuile's Theorie abspielen. Die Tiefe der Ausbuchtung ist natürlich im Verhältniss zur Fortpflanzungsstrecke übertrieben.

Die Gesamtlänge des überhaupt in Bewegung versetzten Theils der Zwischenwand ist gleich dem Product vT , wenn wir mit v die

von E. ter Kuile vorausgesetzte Fortpflanzungsgeschwindigkeit bezeichnen. Das Product vT , d. h. eine Geschwindigkeit multiplicirt mit einer Zeit, hat natürlich die Dimension einer Strecke. Ich werde vT als Streckeneinheit annehmen und in der Figur willkürlich darstellen durch eine Strecke von 100 mm. Die horizontalen Linien bedeuten die Zwischenwand zu verschiedenen Zeiten. Die linke Seite bedeutet die Zwischenwand am Anfange der Schnecke, in der Nähe des runden Fensters. Von der Zeit 0 bis zur Zeit a bewegt sich der Steigbügel dauernd einwärts und ruft daher eine dauernde Ausbuchtung hervor, die sich zur Zeit a bis zum Punkte av fortgepflanzt hat. Von der Zeit a bis zur Zeit b pflanzt sich die Welle immer weiter fort, verliert aber gleichzeitig durch die dauernde negative Bewegung des Steigbügels mehr und mehr von ihrem hinteren Ende. Da jedoch die negative Bewegung des Steigbügels, wie man aus der Curve *III* der Figur 1 erkennt, nicht so gross ist wie die vorhergehende positive Bewegung, und da deshalb die Flüssigkeitsmenge, für die vom Steigbügel Platz gemacht wird, kleiner ist als die vorher von ihm verdrängte Flüssigkeitsmenge, so wird die Ausbuchtung nicht gänzlich aufgelöst, sondern ein Rest bleibt übrig, der beständig weiter fortwandert, wie in Figur 2 zu sehen ist. Während der Zeit b bis c macht der Steigbügel wieder eine positive Bewegung und ruft dadurch eine neue Ausbuchtung hervor, die sich innerhalb dieser Zeit fortpflanzt um die Strecke $(c-b)v$. Von der Zeit c bis zur Zeit d macht der Steigbügel wieder eine negative Bewegung von gleicher Grösse wie die vorhergehende positive Bewegung, wodurch die zuletzt erzeugte, beständig fortwandernde Ausbuchtung aufgelöst wird. Zur Zeit $d-\delta$ sehen wir in Figur 2 eben noch den letzten Rest der Ausbuchtung verschwinden. Von der Zeit d bis zur Zeit e macht der Steigbügel eine dritte positive Bewegung, wodurch eine dritte Ausbuchtung hervorgerufen wird, die sich während dieser Zeit über die Strecke $(e-d)v$ fortpflanzt. Von der Zeit e bis zur Zeit f macht der Steigbügel wieder eine negative Bewegung von derselben Grösse wie die vorhergehende positive Bewegung. Die beständig weiter fortschreitende dritte Ausbuchtung wird dadurch vom hinteren Ende her aufgelöst. Zur Zeit $f-\delta$ sehen wir in Figur 2 das letzte Stück der Ausbuchtung eben bereit zu verschwinden. Die Entfernung des Punktes, wo der letzte Rest dieser Ausbuchtung verschwindet, vom Anfangspunkt der Zwischenwand, ist gleich $(f-d)v$. Der Ueberrest der ersten

Ausbuchtung ist zur Zeit f bis zum Punkte fv fortgewandert. Von der Zeit f bis zur Zeit T fährt der Steigbügel in der negativen Bewegung fort. Da näherliegende Ausbuchtungen, die aus physikalischen Gründen allemal den Vorzug haben, jetzt nicht bestehen und somit nicht aufgelöst werden können, so muss nun auch der Ueberrest der ersten Ausbuchtung daran glauben. Wie man leicht sieht, verschwindet das letzte Stück dieser Ausbuchtung genau zur Zeit T auf dem Punkte Tv .

Wir wollen nun die Strecken, über die sich die drei Ausbuchtungen fortpflanzen (die „markirten“ Strecken), in Zahlen ausdrücken.

Fortpflanzungsstrecke der ersten Ausbuchtung: $Tv = 1,000$
Streckeneinheiten.

Fortpflanzungsstrecke der zweiten Ausbuchtung: $(d-b)v = 0,256$
Streckeneinheiten,

Fortpflanzungsstrecke der dritten Ausbuchtung: $(f-d)v = 0,296$
Streckeneinheiten.

Die empfundenen Tonhöhen, ausgedrückt durch Schwingungszahlen, wie sie den einzeln gehörten Tönen zukommen, müssen sich nach E. ter Kuile's Theorie verhalten wie die reciproken Werthe der obigen Strecken, d. h. wie 1,00:3,91:3,38. Wenn z. B. die ursprünglichen Töne die Schwingungszahlen 200 und 300 haben, so müssten wir beim Zusammenklange nach E. ter Kuile's Theorie die Töne 100, 338 und 391 hören. In Wirklichkeit aber hören wir die Töne 100, 200 und 300. In musikalischer Bezeichnung ist das Ergebniss das folgende, wenn die Primärtöne mit g und d' bezeichnet werden:

Primärtöne einzeln: — g, d' . — —

Beim Zusammenklange zu hören nach E. ter Kuile's

Theorie: $G, — — f', g'$.

Beim Zusammenklange in Wirklichkeit gehört: . . G, g, d' . — —

Zu einer solchen Consequenz führt E. ter Kuile's Theorie bereits in dem einfachen Fall des Zusammenklangs von nur zwei Sinusschwingungen in dem einfachen Schwingungszahlverhältniss 2:3. Wie es mit der Uebereinstimmung von Theorie und Wirklichkeit in complicirteren Fällen steht, ist unter diesen Umständen eine ganz überflüssige Frage.

B. Nachdem wir uns im vorstehenden Abschnitt von der Unmöglichkeit von E. ter Kuile's Theorie des Hörens überzeugt

haben, will ich nun denselben speciellen Fall durchführen unter Zugrundelegung meiner eigenen Theorie, nach der die empfundene Tonhöhe bestimmt wird durch die Anzahl der Erschütterungen, die eine sensible Zelle erfährt, die empfundene Tonintensität durch die Anzahl der Zellen, die von dem Reiz getroffen werden.

Zunächst müssen wir die Ordinaten der Maxima und Minima von Curve *III* in Figur 1 berechnen. Das absolute Minimum nehmen wir als Ordinatenanfangspunkt. Das mittlere Maximum über *c*, das gleich der Höhe der Primärcurven ist, sei gleich 2. Dann finden wir als Ordinate für die Maxima über *a* und *e* den Werth 3,63,

Fig. 3.

für die Minima über *b* und *d* den Werth 1,29. Eine Ordinateneinheit der Curve *III* soll entsprechen einer Strecke von 25 mm in Figur 3.

Ich will nun die Bewegung der die scala vestibuli und scala tympani trennenden Zwischenwand nach meiner Theorie in ähnlicher Weise darstellen, wie ich dies oben nach E. ter Kuile's Theorie gethan habe¹⁾. Zur Zeit 0 besteht keine Ausbuchtung. Zur Zeit *a*

1) Ich habe in meiner oben erwähnten Abhandlung eine andere Art der geometrischen Darstellung der Bewegung der Zwischenwand angegeben, die vor der obigen unvergleichliche Vorzüge besitzt. Sie gestattet nicht nur eine Uebersicht über die Ausbreitung der Ausbuchtung in der Längsrichtung des Schnecken-canal, sondern zeigt auch genau an, zu welchen Zeiten die Erschütterungen der sensiblen Zellen an jedem einzelnen Punkt der Zwischenwand stattfinden, was theoretisch sehr wichtig ist. Da ich jedoch nicht voraussetzen kann, dass jeder Leser sich bereits mit jener Darstellungsmethode vertraut gemacht hat, so will ich mich oben der unvollkommenen Darstellungsweise bedienen.

hat der Steigbügel eine beträchtliche positive Bewegung gemacht und dadurch eine ganz bestimmte Flüssigkeitsmenge verdrängt, die in einer Ausbuchtung der die scala vestibuli und scala tympani trennenden Zwischenwand Platz finden muss (und gleichfalls natürlich in einer Ausbuchtung der Membran des runden Fensters). Beim Beginn der Bewegung des Steigbügels buchtet sich die Zwischenwand nur in nächster Nähe des runden Fensters aus. Sobald jedoch die von mir angenommene Grenze der Tiefe der Ausbuchtung erreicht ist, muss sich die Ausbuchtung nothgedrungen (in Folge der fortgesetzten Verdrängung von Flüssigkeit durch den Steigbügel) nach der Spitze der Schnecke zu ausbreiten. Die Länge des Theils der Zwischenwand, über den sich die Ausbuchtung erstreckt, wollen wir der Einfachheit wegen annehmen als proportional der Bewegungsweite des Steigbügels¹⁾, also in diesem Falle proportional 3,63. Von der Zeit *a* bis zur Zeit *b* macht der Steigbügel eine negative Bewegung von der Tiefe $3,63 - 1,29 = 2,34$. Zur Zeit *b* ist demnach eine 2,34 proportionale Strecke der Zwischenwand in die Anfangslage zurückgeführt, während der Rest in der Ausbuchtung verharret, da nach Voraussetzung die Wirkung der etwa vorhandenen Elasticität der Zwischenwand so klein ist, dass sie während der in Frage kommenden kurzen Zeit vernachlässigt werden kann. Von der Zeit *b* bis zur Zeit *c* macht der Steigbügel wieder eine Bewegung im positiven Sinne von der Weite $2,00 - 1,29 = 0,71$. Wir finden deshalb in der Figur zur Zeit *c* eine Strecke der Zwischenwand proportional 0,71 vom Anfange her wieder ausgebuchtet. Zur Zeit *d* ist diese letztere Ausbuchtung wiederum vernichtet. Von der Zeit *d* bis zur Zeit *e* macht der Steigbügel wiederum eine positive Bewegung von der Weite 2,34, der eine proportionale Ausbuchtung entspricht. Von der Zeit *e* bis zur Zeit *T* macht der Steigbügel eine negative Bewegung von der Weite 3,63. Zur Zeit *T* ist die Zwischenwand wieder in die Anfangslage zurückgekehrt.

Wir sehen nun aus der Figur, dass alle sensiblen Zellen, die am Anfange der Zwischenwand gelegen sind, dreimal während der

1) In Wirklichkeit dürfte jedoch keine Proportionalität vorliegen, da die Zwischenwand in verschiedenen Theilen des Schneckenkanals verschiedene Breite hat. Die Wirkung der verschiedenen Breite der Zwischenwand habe ich bereits 1898 ausführlich untersucht in meiner Abhandlung „Ueber die Intensität der Einzeltöne zusammengesetzter Klänge“. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane Bd. 17 S. 1—14.

Zeit T erschüttert werden. Die auf einer weiteren Strecke gelegenen Zellen werden während derselben Zeit nur zweimal, die auf einer noch weiteren Strecke gelegenen nur einmal erschüttert. Da nun nach meiner Theorie die empfundene Tonhöhe abhängt von der Häufigkeit, mit der die Erschütterungen einander folgen, so müssen wir nach meiner Theorie in diesem Falle die Töne 3, 2 und 1 hören, ganz so, wie es in Wirklichkeit geschieht.

Freilich erkennen wir, wenn wir uns meiner oben erwähnten vollkommeneren geometrischen Darstellungsmethode bedienen, dass die Erschütterungen nicht in ganz regelmässigen Zeitabschnitten aufeinander folgen. Wir müssen daher annehmen, dass derselbe Ton gehört wird, wenn die Erschütterungen in etwas unregelmässigen, als wenn sie in ganz regelmässigen Intervallen erfolgen. Dies ist jedoch keine willkürliche Annahme, keine Hülfshypothese, sondern eine Annahme, zu der uns beobachtbare Thatsachen zwingen. Man kann nämlich mit Hülfe einer Sirene leicht feststellen, dass in der That derselbe Ton gehört wird, auch wenn die Aufeinanderfolge etwas unregelmässig ist, wenn nur die Unregelmässigkeit eine gewisse Grenze nicht überschreitet.

Wir sehen, dass meine Theorie in ganz einfacher Weise zu einer vollkommenen Uebereinstimmung mit den Thatsachen führt, während die Theorie E. ter Kuile's in demselben Falle in einen unauflösbaren Widerspruch mit der Erfahrung geräth. Die Anwendung meiner Theorie auf complicirtere Zusammenklänge findet man untersucht in den erwähnten Abhandlungen von mir. Eine Untersuchung einer Anzahl weiterer specieller Fälle gedenke ich demnächst zu veröffentlichen.

2. Zweiter Beweis der Unmöglichkeit von E. ter Kuile's Theorie.

In Figur 4 sind dargestellt drei Curven a , b und c , alle von derselben Periode. Curve a ist eine einfache, die ganze Periode T ausfüllende Sinusschwingung, wie sie angenähert hervorgebracht wird von einer Stimmgabel auf Resonanzkasten. b und c stellen ebenfalls (es könnten jedoch auch andere Curven sein) einfache Sinusschwingungen dar, die aber nicht die ganze Periode ausfüllen. Vielmehr erfüllt in b die Sinusschwingung nur die Hälfte, in c nur ein Fünftel der Periode. Schwingungen von der Art, wie die durch

die Curven *b* und *c* dargestellten, kann man leicht mittelst einer Lochsirene hervorbringen.

Welche Tonhöhen muss man nun nach E. ter Kuile's Theorie in diesen drei Fällen hören? Betrachten wir zunächst die Curve *a*. Von der Zeit *o* bis zur Zeit $\frac{T}{2}$ macht der Steigbügel eine positive Bewegung, wodurch nach E. ter Kuile eine sich beständig mit der Geschwindigkeit *v* fortpflanzende Ausbuchtung der die scala vestibuli und scala tympani trennenden Zwischenwand hervorgerufen wird. Zur Zeit $\frac{T}{2}$ erstreckt sich diese Ausbuchtung bis zum Punkte

Fig. 4.

$\frac{Tv}{2}$. Von der Zeit $\frac{T}{2}$ bis zur Zeit *T* macht der Steigbügel eine negative Bewegung von derselben Weite wie die vorhergehende positive Bewegung. Während dieser Zeit pflanzt sich die Ausbuchtung immer weiter fort, wird jedoch vom hinteren Ende her beständig verkürzt, sodass sie zur Zeit *T* gänzlich verschwindet. Beim Verschwinden zur Zeit *T* erreicht die Ausbuchtung den entferntesten Punkt *Tv*, der nach E. ter Kuile's Theorie die empfundene Tonhöhe bestimmt.

Im Falle *b* haben wir einen ähnlichen Vorgang; nur verschwindet hier die Ausbuchtung schon zur Zeit $\frac{T}{2}$, und der entfernteste Punkt, den die Ausbuchtung erreicht, ist $\frac{Tv}{2}$. In der Zeit von $\frac{T}{2}$ bis *T* geschieht gar nichts. Von der Zeit *T* an wiederholt sich derselbe Vorgang, wie von der Zeit *o* an.

Im Falle c haben wir einen ähnlichen Vorgang. Doch verschwindet hier die Ausbuchtung schon zur Zeit $\frac{T}{5}$. Der entfernteste Punkt, der von der Ausbuchtung bei ihrer Fortschreitung erreicht wird, ist der Punkt $\frac{Tv}{5}$.

Die entferntesten Punkte, die von den fortschreitenden Ausbuchtungen erreicht werden, sind also in den Fällen a , b und c resp. Tv , $\frac{Tv}{2}$ und $\frac{Tv}{5}$. Die empfundenen Tonhöhen, ausgedrückt durch Schwingungszahlen, verhalten sich nach E. ter Kuile's Theorie umgekehrt wie die von den Ausbuchtungen durchmessenen Strecken, also in den Fällen a , b und c wie $1:2:5$; d. h. nach E. ter Kuile's Theorie des Hörens müssen wir im Falle a den Ton 1 (irgend eine bestimmte Tonhöhe), im Falle b den Ton 2 (die höhere Octave von 1), im Falle c den Ton 5 (die Grosse Terz plus zwei Octaven) hören.

In Wirklichkeit hören wir, wie man sich leicht genug überzeugen kann, in allen drei Fällen dieselbe Tonhöhe. Dieser Widerspruch mit der Erfahrung macht E. ter Kuile's Theorie des Hörens unmöglich.

3. Einige weitere Bemerkungen zu E. ter Kuile's Theorie.

a) Nach E. ter Kuile (S. 507) besteht ein besonderer Vortheil seiner Theorie darin, dass sie erklärt, „die Thatsache, dass bei Verkürzung der Schnecke durch Wegnahme des distalen Theiles Basstaubheit eintritt.“ Ich kann nun zwar E. ter Kuile durchaus nicht darin zustimmen, wenn er eine derartige Behauptung eine „Thatsache“ nennt. Sollte sie aber wirklich eine Thatsache sein, so würde diese Thatsache nur ein neuer Beweis sein für die Unbrauchbarkeit von E. ter Kuile's Theorie des Hörens. Nach dieser Theorie müsste man nämlich nach Wegnahme des distalen Theiles der Schnecke etwas ganz Anderes erwarten als Basstaubheit. Nehmen wir z. B. an, die letzte erhalten gebliebene sensible Zelle entspreche der Tonhöhe a' ; alle distaleren Theile der Schnecke seien fortgenommen. Dann müsste jede auf das Ohr einwirkende Sinusschwingung, die tiefer als a' ist, eine Ausbuchtung erregen, die sich, wenn sie wegen Wegnahme der distaleren Partien auch nicht ferner fortschreiten kann, doch wenigstens bis zur Zelle a'

fortpflanzen müsste. Diese Zelle würde dann die letzte erregte Zelle sein. Es würde also nach E. ter Kuile's Theorie nicht einfach Basstaubheit eintreten, sondern wir würden die merkwürdige Beobachtung zu machen haben, dass alle Töne, die objectiv tiefer sind als a' , empfunden würden als Töne von der Tonhöhe a' .

b) Einen weiteren Vorthail seiner Theorie sieht E. ter Kuile (S. 508) darin, dass seine Theorie angeblich erklärt, „die That-
sache, dass wir die Töne in eine Reihe ordnen“. Dies ist nun allerdings eine unbestreitbare Thatsache, doch kann ich beim besten Willen in E. ter Kuile's Theorie keine „Erklärung“ dieser That-
sache finden. Ich hätte gegen diese Behauptung E. ter Kuile's zu wiederholen, was ich bereits in diesem Archiv (Bd. 78 S. 355 ff.) gegen die ähnliche Behauptung Ewald's gesagt habe.

c) Durch E. ter Kuile's Theorie zieht sich hindurch die Verwechslung zweier ganz verschiedener physikalischer Begriffe, wodurch eine Reihe von Fehlschlüssen herbeigeführt werden: die Verwechslung der Amplitude eines Lufttheilchens mit der Amplitude des Steigbügels. E. ter Kuile spricht z. B. auf S. 503 von zwei Tönen (den tieferen nenne ich t , den höheren h), die von gleicher Intensität seien. Nun behauptet er, wenn die Intensität gleich sei, so gelte die Formel $n_t^2 A_t^2 = n_h^2 A_h^2$, wo n die Schwingungszahlen, A die Amplituden bedeutet. In einem speciellen Falle verhalte sich $n_t:n_h = 1:8$. Dann verhält sich nach der obigen Formel bei gleicher Intensität der Töne $A_h:A_t = 1:8$. Hieraus schliesst nun E. ter Kuile, dass die Amplitude des Steigbügels bei gleicher Intensität im Falle des tieferen Tones achtmal so gross sei als im Falle des höheren Tones.

Dass dieser Schluss ganz falsch ist, ist leicht einzusehen. Wir sind allerdings, soweit der Mangel einer exacten Untersuchung eine Annahme gestattet, berechtigt, anzunehmen, dass die Intensität eines Tones physikalisch bestimmt sei durch den Ausdruck $n^2 A^2$, und dass dieser Ausdruck bei zwei verschieden hohen, aber gleich stark empfundenen Tönen einen gleichen Werth erhält. Wir dürfen aber nicht vergessen, was wir hier mit „ A “ bezeichnet haben, die Amplitude der Lufttheilchen nämlich. Die Amplitude des Steigbügels aber ist durchaus nicht proportional der Amplitude der Lufttheilchen. Die Bewegungen des Steigbügels sind nicht bedingt durch Bewegungen der Luft, sondern durch Druckunterschiede

der Luft nach der Zeit. Die Druckunterschiede veranlassen Bewegungen des Trommelfells. Und zwar sind die Ausbuchtungen des Trommelfells proportional den Druckunterschieden. Die Bewegungen des Steigbügels sind wiederum proportional den Bewegungen des Trommelfells; d. h. die Bewegungen des Steigbügels sind proportional den Druckunterschieden der Luft. Jede Curve, die die Bewegungen des Steigbügels darstellt, stellt daher auch (von einem constanten Factor abgesehen) die Variation des Luftdrucks dar, nicht aber die Bewegungen der Lufttheilchen.

Die Druckunterschiede nun in der Luft nach der Zeit sind proportional dem Ausdruck $n^2 A^2$, wo A die Amplitude eines Lufttheilchens ist. Die Druckunterschiede verhalten sich also bei verschiedenen hohen Tönen in folgender Weise:

$$p_t : p_h = n_t^2 A_t^2 : n_h^2 A_h^2.$$

Ist daher $n_t^2 A_t^2 = n_h^2 A_h^2$, so ist auch $p_t = p_h$, d. h. bei Tönen von verschiedener Höhe, aber gleicher Intensität, sind die Druckunterschiede in der Luft nach der Zeit gleich gross. Da nun die Amplitude des Steigbügels proportional ist dem Druckunterschiede, so kommen wir zu folgendem Schluss:

Bei Tönen von verschiedener Höhe, aber gleicher Intensität, sind die Amplituden des Steigbügels gleich gross. Wenn wir daher die Bewegungen des Steigbügels durch eine Curve darstellen, so müssen wir bei Tönen von gleicher Intensität stets Curven von gleicher Amplitude zeichnen, ganz unabhängig von der Periode, wie ich dies in meinen einschlägigen Arbeiten auch stets gethan habe¹⁾.

d) Auf S. 506 behauptet E. ter Kuile, dass André Broca im Jahre 1897 gezeigt habe, „dass ein Ton, ohne dass die Schwingungszahl sich ändert, höher gehört wird, wenn er schwächer, und tiefer, wenn er stärker ist“. Diese Thatsache besteht allerdings, ohne freilich bisher auf ein allgemeineres Gesetz zurückgeführt worden zu sein. Besonders stark ist der Unterschied der empfundenen Tonhöhe bei ziemlich tiefen Tönen, schwach bei höheren Tönen. Indessen ist diese Thatsache durchaus nicht erst

1) E. ter Kuile ist übrigens nicht der Einzige, bei dem sich die erwähnte Verwechselung findet. Sie tritt in ähnlicher Weise auf in einer Abhandlung von O. Abraham „Ueber das Abklingen von Tonempfindungen“, Zeitschrift für Psychol. und Physiol. der Sinnesorgane Bd. 20 S. 417—424. Auch in dieser Abhandlung führt jene Verwechselung zu ganz falschen Schlüssen. Ich habe diese Fehlschlüsse berichtigt in Psychological Review vol. 7 p. 88 ff. 1900.

1897 und auch nicht von Broca entdeckt worden. Sie findet sich z. B. schon 1883 erwähnt in Stumpf's „Tonpsychologie“, Bd. 2 S. 242 f., woselbst man wiederum einen Haufen sehr viel älterer Literatur über denselben Gegenstand finden kann.

e) Nach E. ter Kuile's Theorie kann man schlechterdings nicht einsehen, warum nicht bereits bei einer einzigen Luftwelle eine Tonempfindung von bestimmter Höhe und Stärke entstehen sollte. Alle von E. ter Kuile angenommenen physiologischen Bedingungen für die Entstehung eines Tones sind in diesem Falle durchaus erfüllt. Sirenenversuche haben jedoch gezeigt, dass zum Zustandekommen einer Tonempfindung eine Wiederholung des Reizes erforderlich ist, dass die Wiederholung des Reizes die allerwichtigste physiologische Bedingung einer Tonempfindung ist. Ein einziger Luftstoss erzeugt keine entsprechende Tonempfindung. Doch nur ein zweiter Luftstoss ist erforderlich, um eine nach der Höhe bestimmte Tonempfindung auftreten zu lassen¹⁾. Diese Thatsache ist ein weiterer Beweis für die wissenschaftliche Unbrauchbarkeit von E. ter Kuile's Theorie des Hörens.

f) Schliesslich möchte ich hier noch eine Bemerkung anfügen, die zwar nicht zur Theorie E. ter Kuile's, wohl aber zu meiner Theorie Beziehung hat. Professor Mc Kendrick hat mir die zweifelhafte Ehre erwiesen, meine Theorie mit der Hurst's in eine und dieselbe Kategorie zu rechnen²⁾. Hiergegen muss ich entschieden Protest einlegen. Die Theorie Hurst's, die ich leider nur aus Mc Kendrick's Beschreibung kenne, beruht auf der Annahme, dass sich moleculare Flüssigkeitswellen durch die scala vestibuli bis zur Spitze der Schnecke und von dort zurück durch die scala tympani fortpflanzen. Diese Annahme ist physikalisch unmöglich, da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der Flüssigkeit verhältnissmässig so gross ist und die Steigbügelschwingungen verhältnissmässig so langsam aufeinander folgen, dass wir die Flüssigkeitsdichtigkeit an allen Punkten innerhalb der Schnecke stets als gleich gross (d. h. nur von der Zeit, nicht vom Ort abhängig) zu betrachten haben. Eine derartige physikalische Unmöglichkeit zur Grundlage einer wissenschaftlichen Theorie zu machen, ist mir nie in den Sinn gekommen.

1) Siehe Abraham und Brühl, Wahrnehmung kürzester Töne und Geräusche. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane Bd. 18 S. 177—217. 1898.

2) Mc Kendrick, Perception of Musical Tone. Seventh Boyle Lecture. Oxford 1899.