

Frank Heßler

Funktion des Gehörsinnes

Referat in Biologie

*„Die Musik ist eine verborgene arithmetische Bestätigung
der unbewußt zählenden Seele.“*

Gottfried Wilhelm Freiherr von Leibnits (1646-1716)

„Eigentlich ist das alles viel zu kompliziert!“

Frank Heßler 1994

Inhalt

1 VORWORT	4
2 DER AUFBAU DES GEHÖRS	5
3 FUNKTION DER EINZELNEN TEILE	5
3.1 Außenohr	5
3.1.1 Die Ohrmuschel	5
3.1.2 Der äußere Gehörgang	6
3.1.3 Das Trommelfell	6
3.2 Das Mittelohr	6
3.2.1 Die Gehörknöchelchen	7
3.2.2 Mittelohrmuskeln	7
3.2.3 Eustachische Röhre	7
3.3 Das Innenohr	8
3.3.1 Die Schnecke	8
3.3.2 Das Cortische Organ	8
3.3.3 Der Hörvorgang	9
4 ANMERKUNGEN	10
5 LITERATURNACHWEIS	10

1 Vorwort

Dieses Referat bildet die Nummer neun in einer Reihe von Referaten des Fachs Biologie im Grundkurs. Mit seinem Titel *Funktion des Gehörsinnes* baut es auf sein Vorgängerreferat der laufenden Nummer acht mit dem Titel *Der Bau des Ohres* auf und setzt die Kenntnis der darin enthaltenen Fakten voraus.

Dennoch ist mir der endgültige Inhalt des Vorgängerreferates nicht bekannt und ich kann im Augenblick nur Vermutungen anstellen, welche zum Verständnis dieses Referates wichtigen Fakten nun tatsächlich auch erwähnt werden und welche nicht.

Daher setzt dieses Referat nicht in jedem Falle die Kenntnis des menschlichen Gehörsinnes voraus. Dahingehende Erläuterungen sind jedoch nur als Ergänzung schon bekannter Inhalte zu verstehen.

2 Der Aufbau des Gehörs

Der prinzipielle Aufbau des Gehörs lässt sich in drei Teile darstellen:

1. dem Außenohr: mit Ohrmuschel, wird durch das Trommelfell abgeschlossen
2. dem Mittelohr: Gehörknöchelchen übertragen Schwingungen zum
3. Innenohr: mit Lymphe gefüllt, Sinneszellen zur Tonwahrnehmung

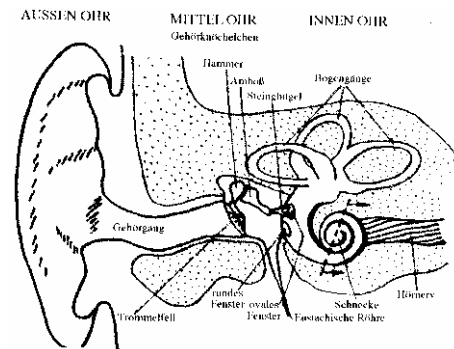


Abbildung 2-1

3 Funktion der einzelnen Teile

3.1 Außenohr

Das Außenohr besteht aus der Ohrmuschel, dem äußeren Gehörgang und dem Trommelfell.

3.1.1 Die Ohrmuschel

Die zusammengedrückte Gestalt der menschlichen Ohrmuschel ist ein bescheidenes Überbleibsel der beweglichen Auffangtrichter vieler anderer Säugetiere.¹ Sie ist trotz einiger an sie heranreichender Muskeln kaum mehr beweglich. Auch die ursprünglich vorhandenen Schließmuskeln sind nur noch in spärlichen Resten zu sehen.ⁱⁱ

Die Ohrmuschel erfüllt zusammen mit weiteren den Schalleindruck beeinflussenden Teilen (wie Kopf, Schultern,...) eine Reihe von Aufgaben:

Nach Linderⁱⁱⁱ dienen lediglich geringe Zeitunterschiede von linkem und rechtem Signal und Intensitätsunterschiede für die Orientierung im Raum. Dies ist sehr unvollständig!

Jeder, der schon einmal einen Kopfhörer benutzt hat, wurde unwillkürlich mit dem Phänomen der IKL¹ vertraut. Hier scheint das Klangereignis im Kopf stattzufinden. Erste skurrile (*sic!*) Theorien kamen um 1950 auf.² Erst in einer 1968 von Reichardt und Haustein veröffentlichten Arbeit wurde die Vermutung geäußert, daß der bei der Kopfhörerwiedergabe ausgeschaltete Einfluß des Außenohres für die IKL verantwortlich wäre.^{iv}

Trifft also ein Schallsignal von der linken Seite auf den Kopf, so kann man durch direkte Messung des Schallsignals vom Trommelfell feststellen, daß das Schallsignal stark deformiert wurde. Unmittelbar einsehbar ist, daß der Impuls am linken Ohr früher als am rechten ankommt. Durch Abschattungswirkung des Kopfes ist außerdem das Signal am rechten Ohr leiser als am linken Ohr. Dazu kommen weitere Effekte, wie Reflexionen an den Schultern, Beugungen und Resonanzerscheinungen an den Ohrmuscheln. Durch die beschriebenen Effekte werden dem Schallsignal bestimmte Merkmale mitgegeben, aus denen das Gehirn den Ort seiner Herkunft „berechnen“ kann.³

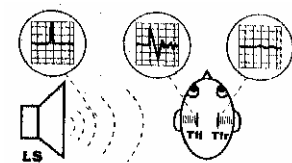


Abbildung 3-1

¹ IKL = (Im-Kopf-Lokalisation)

² Hier wurden u.a. Übermodulation des Nervensystems, die Unveränderlichkeit der Signale am Ohr bei Kopfbewegungen, Kontaktpunkt der Kopfhörer am Ohr und die fehlende Beschallung des Körpers für die IKL verantwortlich gemacht.

³ Experimenteller Beweis 1972.

Der kleinste unterschiedene Winkel, aus dem die Schallquelle kommt beträgt $8,4^{\circ}$ ⁱⁱ oder 7° ⁱ.

Die charakteristische Form und die einzelnen Teile der Ohrmuschel sind individuell sehr verschieden.ⁱⁱ Dementsprechend unterschiedlich ist auch die Art der Beeinflussung des Signals. In bestimmten Bereichen betragen diese Unterschiede im Frequenzgang mehr als zehn Dezibel (dB).⁴

3.1.2 Der äußere Gehörgang

Der äußere Gehörgang ist in seiner inneren Hälfte vom Knochen des Schläfenbeins umgeben, in seiner äußeren von einer Röhre aus elastischen Knorpeln, die in den ebenfalls elastischen Knorpel der Ohrmuschel übergeht. Die Haut des knorpeligen Gehörganges trägt starke Haare, die als Reusen gegen eindringliche Fremdkörper (z.B. Insekten) wirken.ⁱⁱ An den Haaren sitzen große Talgdrüsen. Außerdem liegen in dieser Haut zahlreiche apokrin sezernierende Drüsen⁵, die sog. Ohrenschmalzdrüsen. Das Ohrenschmalz ist aber eine Mischung des gelblichen Sekrets der Ohrenschmalzdrüsen mit dem Talg der Talgdrüsen, abgeschliffenen Epithel und eingedrungenem Schmutz.ⁱⁱ

3.1.3 Das Trommelfell

Das Trommelfell (*Membrana tympani*) ist eine hauchdünne (0,1 mm), auf beiden Seiten epithelüberzogene, nahezu kreisrunde

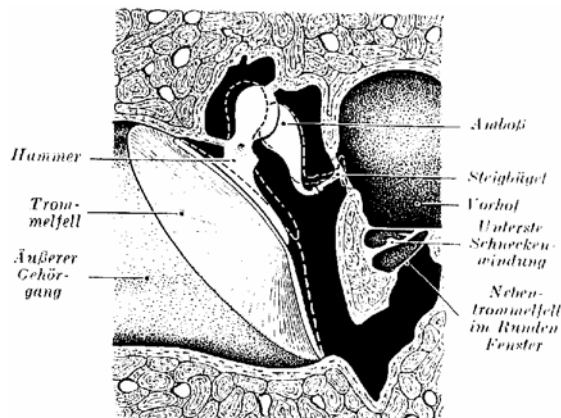


Abbildung 3-2

Bindegewebsmembran, die in eine ringförmige Rinne des Knochens eingelassen ist. Es wird durch radiäre und zirkuläre Faserzüge straff gespannt, nur oben ist es locker. Das Trommelfell bildet jedoch keine ebene Fläche, sondern hat, wegen seiner Anheftung an den Hammergriff (s.unten), die Form eines flachen Kegelzettes, dessen

Mittelpunkt etwas weiter in die Paukenhöhle hineinragt als der Umfang.ⁱⁱ

Von der Spannung des Trommelfells hängt die deutliche Wahrnehmung der aufgenommenen Töne ab; sie lässt im Alter oft nach.^v

Durch die weiche Aufhängung des Trommelfells und des daran befestigten Gehörknöchelchens werden Resonanzwirkungen vermieden, bzw. in den nicht hörbaren Subtonbereich verschoben.ⁱⁱⁱ

⁴ Dezibel (dB) ist die Maßeinheit für den Schalldruckpegel. Die Schwelle, von der an ein Ton gerade hörbar ist, bezeichnet man mit 0 Bel. Ein Flüstern ist etwa 1000 Mal so laut und wird, da Bel logarithmisch berechnet wird, mit 3 Bel beschrieben ($1000=10^3$). Da das Bel als Maßeinheit zu groß ist, verwendet man Dezibel, ein Maß, das einem Zehntel Bel entspricht: Flüstern = 30 dB

⁵ Bei der apokrinen Sekretion (apó, gr. von weg) bleibt die Zelle mit ihrem Kern erhalten und verwandelt jeweils nur einen Teil ihres (danach sich wieder ergänzenden) Plasmas in Sekret.

3.2 Das Mittelohr

Das Mittelohr (*Cavum tympani*) ist ein schmaler, luftgefüllter, schleimhautausgekleideter Hohlraum, der durch die Ohrtrompete (*Tube, Tuba auditiva* oder *Eustachische Röhre*) mit dem Rachenraum in Verbindung steht (siehe Abbildung 3). Bei starken Schwankungen des Außendrucks - etwa bei Fahrten im Gebirge oder beim Tauchen - kann über diese Röhre ein Druckausgleich zwischen Mittelohr und Außenwelt geschaffen werden.^{vi} Der Durchmesser des Mittelohrs vom Trommelfell zur Innenwand beträgt nur 5 mm. Die Lage dieses flachen Spaltraums ist schräg nach außen hinten geneigt wie das Trommelfell selbst. Bei Neugeborenen liegen Trommelfell und Paukenhöhle noch nahezu horizontal und richten sich erst im Laufe der Jahre auf.ⁱⁱ

3.2.1 Die Gehörknöchelchen

Die Schwingungen des Trommelfells werden über die drei Gehörknöchelchen an das Innenohr weitergeleitet. Die Gehörknöchelchen selber bilden eine Art mechanische Übersetzung, in einem Verhältnis von etwa 60 : 1 die Schwingungsamplitude des Trommelfells an die Impedanzverhältnisse⁶ des Innenohrs anpaßt.^{vi}

An der Innenseite des Trommelfells ist der Hammer (*Malleus*) mit seinem Griff befestigt, dessen Spitze die Trommelfellmitte erreicht. Der Kammerkopf liegt in der Kuppel des Mittelohrraumes und ist hier mit dem Körper des nächsten Knöchelchens, des Amboß (*Incus*), gelenkig verbunden. Vom Amboßkörper erstreckt sich ein Fortsatz, der nicht ganz so lang wie der Hammergriff und an seinem unteren Ende abgebogen ist, zum Steigbügel (*Stapes*), mit dem er straff gelenkig verbunden ist.ⁱⁱ

Die Gehörknöchelchen sind also ein bewegliches Hebelsystem, das durch kleine Muskeln mehr oder weniger versteift werden kann. Bei versteiftem Hören wird die Schallenergie um das 2-3fache verstärkt übertragen. Weiter verstärkt werden die Schallwellen durch den Größenunterschied von Trommelfell (60 mm²) und dem 20-30mal kleineren ovalen Fenster. Insgesamt erfährt der in der Schnecke des Innenohrs ankommende Schalldruck eine etwa 180fache Verstärkung.^v

3.2.2 Mittelohrmuskeln

Wie schon erwähnt kann der Verstärkungseffekt der Gehörknöchelchen durch Muskeln reguliert werden. Es gibt deren zwei. Der Trommelfellspanner kommt von der Tube. Bei seiner Kontraktion durch den Nervus trigeminus wird mit dem Hammergriff das Trommelfell nach innen gezogen und gespannt. Der Steigbügelmuskel kommt aus der Innenwand und geht an das Steigbügelköpfchen heran. Bei seiner Kontraktion durch den Nervus facialis wird der Steigbügel verkantet und dadurch festgestellt.ⁱⁱ

Seine Lähmung hat eine gesteigerte Hörempfindlichkeit zur Folge. Beide Muskeln dienen wohl dazu, eine Schädigung des Innenohrs durch überstarke Schallreize zu verhindern.ⁱⁱ

3.2.3 Eustachische Röhre

Wie bereits gesagt dient die Eustachische Röhre zum Druckausgleich zwischen Mittelohr und Außenwelt. Sie wird jedoch nur beim Schluckakt durch die Gaumenmuskeln geöffnet. Eine ständig geöffnete Tube würde wohl die Schallwellen

⁶ Impedanz ~ Eingangswiderstand

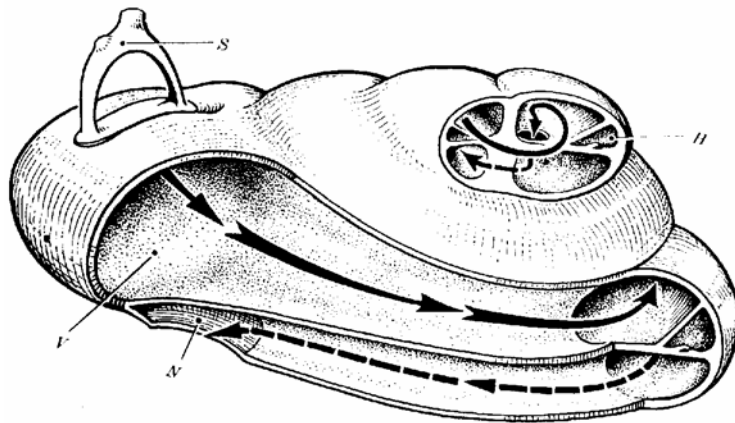
aus Mund und Nase das Nebentrommelfell in Schwingungen versetzen, was zu Interferenz folgte.ⁱⁱ

3.3 Das Innenohr

3.3.1 Die Schnecke

Das innere Ohr ist in die 2½ umfassende knöcherne Schnecke eingelagert. Zwei fensterartige, durch Häute verschlossene Durchbrechungen des Knochens, das ovale und das runde Fenster, verbinden die Schnecke mit dem Mittelohr.ⁱⁱⁱ Der häutige Schneckengang (*Ductus cochlearis*) ist schwingungsfähig in der knöchernen Schnecke befestigt. Dadurch wird der knöcherne Schneckengang in drei flüssigkeitserfüllte spiralförmige Gänge unterteilt. Oben ist die perilymphegefüllte⁷ Vorhofstreppe, die mit der Perilymphe des Vorhofs in Verbindung steht. Darunter liegt die ebenfalls mit Perilymphe gefüllte Paukentreppe, die am Ende der Grundwindung durch das im Runden Fenster eingeführte Nebentrommelfell vom Mittelohrraum getrennt ist. Zwischen denen beiden liegt die mit Endolymphe⁸ gefüllte häutige Schnecke von dreieckigem Querschnitt.

Vorhofstreppe und Paukentreppe gehen aber an der Schneckenspitze ineinander über. Diese Verbindung heißt Heliotrema.⁹



S Steigbügel im Ovalen Fenster, V Vorhof und Beginn der Vorhofstreppe, N Nebentrommelfell im Runden Fenster am Ende der Paukentreppe, H häutiger Schneckengang. Nach Neubert

Um die Sache an dieser Stelle etwas zu vereinfachen, zeigt dieses Bild mehr, als man je mit Worten über die Schnecke sagen könnte.

Die Schallschwingungen werden nun vom Steigbügel auf das ovale Fenster des Innenohrs übertragen. Damit werden die mechanischen Schwingungen unter

Abbildung 3-3

Druckverstärkung auf die Perilymphe des Vorhofes übertragen. Dieser steht mit der Vorhofstreppe in weit offener Verbindung.ⁱⁱ Die Perilympfschwingung setzt nun den häutigen Schneckengang in Bewegung. Damit die Perilymphe schwingen kann, ist eine Ausweichmöglichkeit in der Paukentreppe notwendig. Dazu dient das Nebentrommelfell im Runden Fenster.

Der Boden den Schneckenganges wird von der ca. 33 mm langen Basilarmembran gebildet. Sie wird nach der Schneckenspitze zu immer breiter.ⁱⁱⁱ Auf ihr sitzt das eigentliche, reizaufnehmende Hörorgan, das Cortische Organ.ⁱⁱ

3.3.2 Das Cortische Organ

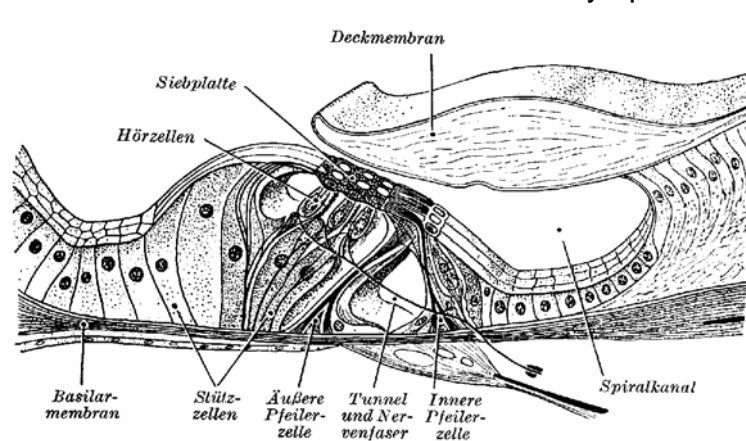
Auf der Mitte der Basilarmembran erheben sich die Epithelzellen zu großer Höhe. Die meisten dieser Zellen sind Stützzellen. Die Stützzellen tragen eine große Zahl von V-förmig angeordneten Sinneszellen weniger µm Länge. Sie stehen bei der

⁷ Die Perilymphe ist etwas weniger viskös als die Endolymphe und besteht aus einer Interzellulärsubstanz.

⁸ Die Endolymphe ist eine hochvisköse (=sehr fließfähige) Flüssigkeit.

⁹ *helix*, gr. die Schnecke; *tréma*, gr. das Loch

Grundwindung der Schnecke 3-reihig und in der Spitzenwindung 4-reihig. Die Sinneshärchen können an der Oberfläche von der Endolymphe bewegt werden.



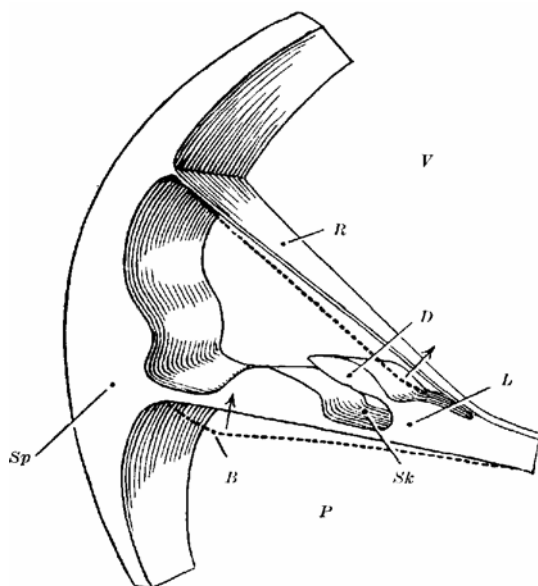
Über den Sinneszellen liegt eine sie berührende Deckmembran.ⁱⁱⁱ

3.3.3 Der Hörvorgang

Abbildung 3-4

häutige Schneckengang zwischen den beiden Treppen in der Frequenz der Töne minimal mit. Dabei hat die Reißnersche Membran ihr Schwingungsmaximum limbusnah¹⁰, während die Basilarmembran ihres limbusfern hat (siehe Abbildung 3-5).

Schwingt nun die Perilymphe, so schwingt auch der ganze



Genau in der Verbindungslinie dieser Maxima liegt die Oberfläche des Cortischen Organs.ⁱⁱ Dort kommt also auch die maximale Schwingung zusammen, wo die Sinneshärchen liegen.

Die Fähigkeit des Gehörs, bestimmte Frequenzen einzeln wahrzunehmen, resultiert aus der Tatsache, daß nur bestimmte Abschnitte der Schnecke für bestimmte Frequenzen zuständig sind. Die früher von Helmholtz initiierte Resonanztheorie ist allerdings falsch.ⁱⁱ Er glaubte, die

Die Orte der größten Ausschläge sind durch Pfeile gekennzeichnet.
 Sp Spiralbändchen, B Basilarmembran, R Reißnersche Membran, D Deckmembran, Sk Spiralkanal, L Limbus, V Vorhofstreppe, P Paukentreppe.
Aus Neubert

Basilarmembran sei fest gespannt und so würden bestimmte Abschnitte je nach entsprechender Tonfrequenz isoliert schwingen. (Selbst in fand ich noch diese

Abbildung 3-6

einer Publikation aus dem Jahr 1988 Theorie: Rainer Felix; Geräusch, Klang, Musik - Ein spektraltheoretischer Zugang; Minerva Publikation München 1988). Aber die Basilarmembran ist nicht fest gespannt, sondern ist ein praktisch spannungsfreies Häutchen.

In der Spitzenwindung der Schnecke werden die tiefsten Töne (von etwa 16 Hz an, das ist der Ton C²), in der Basalwindung¹¹ die höchsten (ausnahmsweise bis zu 21000Hz, das ist der Ton e⁷) rezipiert. Die Nachgiebigkeit der Basilarmembran steigt sehr schnell mit wachsendem Abstand vom Ovalen Fenster und dementsprechend

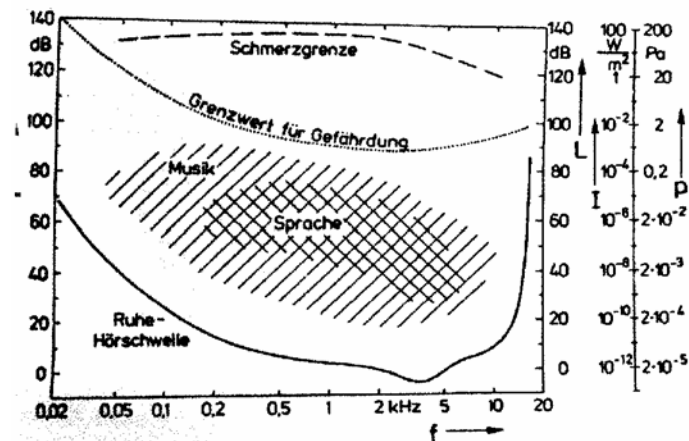
¹⁰ limbus, der Saum

¹¹ Grundwindung

fällt ihre Elastizität in dieser Richtung ab.ⁱⁱ Deshalb werden je nach Schwingungszahl verschiedene Stellen der Basilarmembran verschieden stark erregt. Die hochfrequenten Schwingungen versetzen, da sie nur auf die weniger nachgiebige Basilarmembran wirken können, diese in der Nähe des Ovalen Fensters in Eigenschwingung. Die niederfrequenten Schwingungen bewirken dies in steigend größerem Abstand vom Ovalen Fenster. Bei einem Klang oder Geräusch werden also verschiedene Abschnitte der Basilarmembran in Schwingung versetzt..ⁱⁱ

4 Anmerkungen

Der für das menschliche Ohr wahrnehmbare Frequenzbereich liegt zwischen 20 Hz und 20 kHz. Das Ohr kann Laute wahrnehmen, die das Trommelfell nur um 0,00000001 mm durchbiegen. Ein gutes Ohr kann zwischen Hoch und Tief ca. 1600 verschiedene Frequenzen unterscheiden. Zwischen laut und leise kann man etwa 350 Tonstärken empfinden.ⁱ Dies bedeutet einen Dynamikumfang von 135 dB (derzeitige Digitalsysteme wie CD 96dB).^{vi} Die untere Abbildung zeigt die Hörfläche des menschlichen Gehörs.



5 Literaturnachweis

- ⁱ Anthony Smith
Unser Körper
Fischer Taschenbuch Verlag, 1971
ISBN 3-436-01464-8
- ⁱⁱ Biologie des Menschen
Ein Lehrbuch der Anatomie
Physiologie und Entwicklungsgeschichte des Menschen für Nichtmediziner
Quelle & Meyer 1968, Heidelberg
- ⁱⁱⁱ Linder Biologie
Lehrbuch für die Oberstufe
J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung Stuttgart 1989
ISBN 3-476-20347-6
- ^{iv} Keys - Magazin für Keyboard, Computer & Recording Heft 5
PPV Presse Verlags GmbH
Bergkirchen, 1992
- ^v Reinhold Pfandzelter
Menschenkunde
Bayerischer Schulbuch-Verlag, München 1989
- ^{vi} Das Livesound ABC

