

Prof. Dr. Horst Völz

Möglichkeiten, Anwendungen und Grenzen von Visualisierung und Sonifikation

Dieses Material beruht u. a. auf den Büchern (weitere Literatur am Ende)

Völz, H.: Das Mensch-Technik-System. Expert-Verlag, Renningen - Malsheim 1999 + Linde-Verlag

Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 2 Technik und Geschichte vorelektronischer Medien.
Shaker Verlag Aachen 2005

Letzteres ist auch auf der CD enthalten:

Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Datenspeicher von der Steinzeit bis ins 21. Jahrhundert. Digitale Bibliothek Bd. 159,
Berlin 2007

Bei Angabe der Quelle ist das Material zum privaten Gebrauch voll nutzbar

Bei kommerzieller Nutzung bzw. in Publikationen usw. ist eine Abstimmung mit mir notwendig

Bilder in höherer Qualität sind verfügbar als: ca. 2000×3000 Pixel oder *.cdr Version 12

Material downloadbar von: www.horstvoelz.de

Email: [h.voelz\(at\)online.de](mailto:h.voelz(at)online.de)

Prof. Dr. Horst Völz, Koppenstr. 59, 10243 Berlin, Tel./Fax 030 288 617 08

Ankündigung

Zunächst werden die physiologischen Grundlagen der beiden Sinne aufgezeigt (u. a. Helligkeiten, Farbunterscheidungen, Schallpegel, Kombinationsfrequenzen, Frequenzabweichungen) und daraus die informationstheoretischen Möglichkeiten abgeleitet. Es folgen die technischen Möglichkeiten zum Über- und Unterschreiten der Limits (u. a. Lupe, Mikroskop, Fernrohr, Mikrofon, Schallanalyse, Einsatz elektronischer Verfahren, andere Strahlungsquellen). Dann folgen die Methoden der Abbildung, des 3D-Bildes, der Holografie und der Signalabtastungen. Schließlich werden die wichtigsten Methoden der Visualisierung und Sonifikation mit Beispielen aus Medizin, Technik, Forschung und Astronomie dargestellt.

Vorbemerkung

Primär nehmen wir die **Welt ganzheitlich** mit all unseren Sinnen wahr.
Dabei sind die Grenzen durch unsere Wahrnehmungsmöglichkeiten erheblich eingeschränkt.
Deshalb schuf sich der Mensch **Geräte, Techniken** usw. die eine detailliertere Wahrnehmung ermöglichen.
Sie betreffen **Kleines** (Lupe, Mikroskop), **Fernes** (Teleskop) und nicht unmittelbar **Wahrnehmbares** (Körperinneres, Strahlungen usw.).
Ergänzt wurde dieses Vorgehen durch vorausschauendes (wissenschaftliches) **Denken** und **Ableiten**.
Beide Ergebnisse bewirkten nicht selten deutliche **Widersprüche und Zweifel**.
Als z. B. **Galilei den Pabst** bat, durch Fernrohr zu schauen und sich zu überzeugen, gab der die Antwort:
Wenn Gott gewollt hätte, dass wie so etwa sehen, hätte er uns andere Augen gemacht.
Boltzmann begründete seine noch heute voll gültige statistische Thermodynamik auf die Atome.
Viele damaligen Physiker kritisierten das, denn noch niemand habe Atome gesehen.
Dieses und Ähnliches trieb ihn schließlich in den Freitod.
Eigentlich könnten wir bei **Handy und Internet** ähnlich negativ argumentieren.
Sie müssen hier Ihren Partnern nicht einmal irgendwie kennen, er muss nicht einmal existieren.
Der entsprechende Fortschritt für die Medien ist also **mit beachtlichen Opfern erkaufte**.
Aber auch heute sind in einigen Fällen (Internet) kritische Vorbehalte angebracht.
Solche Zusammenhänge wären Anlass zu einem **Essay**.
Sie sollten aber zumindest im **Hintergrund** im Folgenden beachtet werden.

Abgrenzung

Mit unseren Sinnen (Sehen, Hören, Fühlen, Riechen und Schmecken) nehmen wir unsere Welt wahr. Doch Vieles in der Welt besitzt nicht entsprechende Eigenschaften.

Dieses müssen wir uns dann **indirekt durch Umformungen zugänglich machen**.

Bevorzugt ist dabei die Umwandlung in Bilder, seltener in Schall.

Probleme bereiten dabei insbesondere **Fühlen, Riechen und Schmecken**.

Sie verlangen nämlich immer einen **direkten Kontakt** mit den wahrzunehmenden Gegebenheiten.

Daher ist für sie die Wandlung deutlich schwieriger und kommt auch selten vor.

Ein typisches Beispiel betrifft **Ort-Erkundigungen**:

Ein Forschungstrupp gelangt nach langer Wanderung zu einem großen Wasser.

Die Frage ist, ob es sich schon um den Ozean oder nur um einen See bzw. Fluss handelt.

Schmeckt das Wasser salzig, so ist es der Ozean. (Gefahr giftige Substanzen!)

In analoger Weise können wir z. B. **riechen**, ob der Fisch noch frisch oder bereits verdorben ist.

Im Dunkeln oder ein Blinder kann bei einem Material mit **Befühlen** über die Wärmeableitung usw. feststellen, ob Metall oder Kunststoff vorliegt.

Riechen und Schmecken sind stark mit **Emotionen** gekoppelt (Gourmet; Freude $\Leftrightarrow$ Ekel)

Beispiele für Fühlen, Riechen und Schmecken sind so selten und wenig gebräuchlich, dass sie im Weiteren unbeachtet bleiben können.

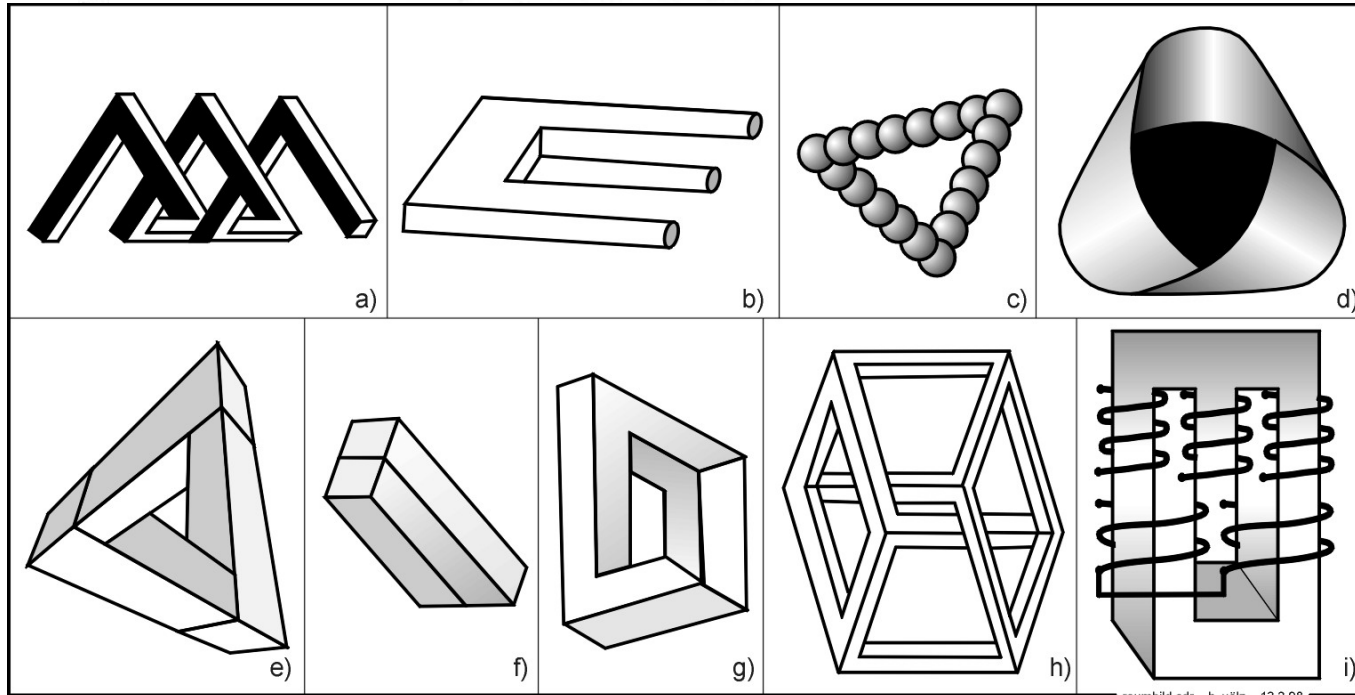
Zum Aufbau der Vorlesung

Unser Sehen und Hören erfolgt über hoch komplexe Sinnesleistungen.
Bevor dafür Beispiele untersucht werden, ist es notwendig die entsprechenden Fakten bereitzustellen
daher erfolgt zunächst eine genauere Beschreibung unserer Seh- und Hörleistungen.
Oft ist mit unseren Wahrnehmungen auch eine subjektive Bewertung verknüpft.
Sie äußert sich vor allem als Emotion. Deshalb muss auch ihr Geschehen sehr kurz erklärt werden.
Einen gewissen Einfluss auf all diese Zusammenhänge besitzt schließlich noch unser Gedächtnis.

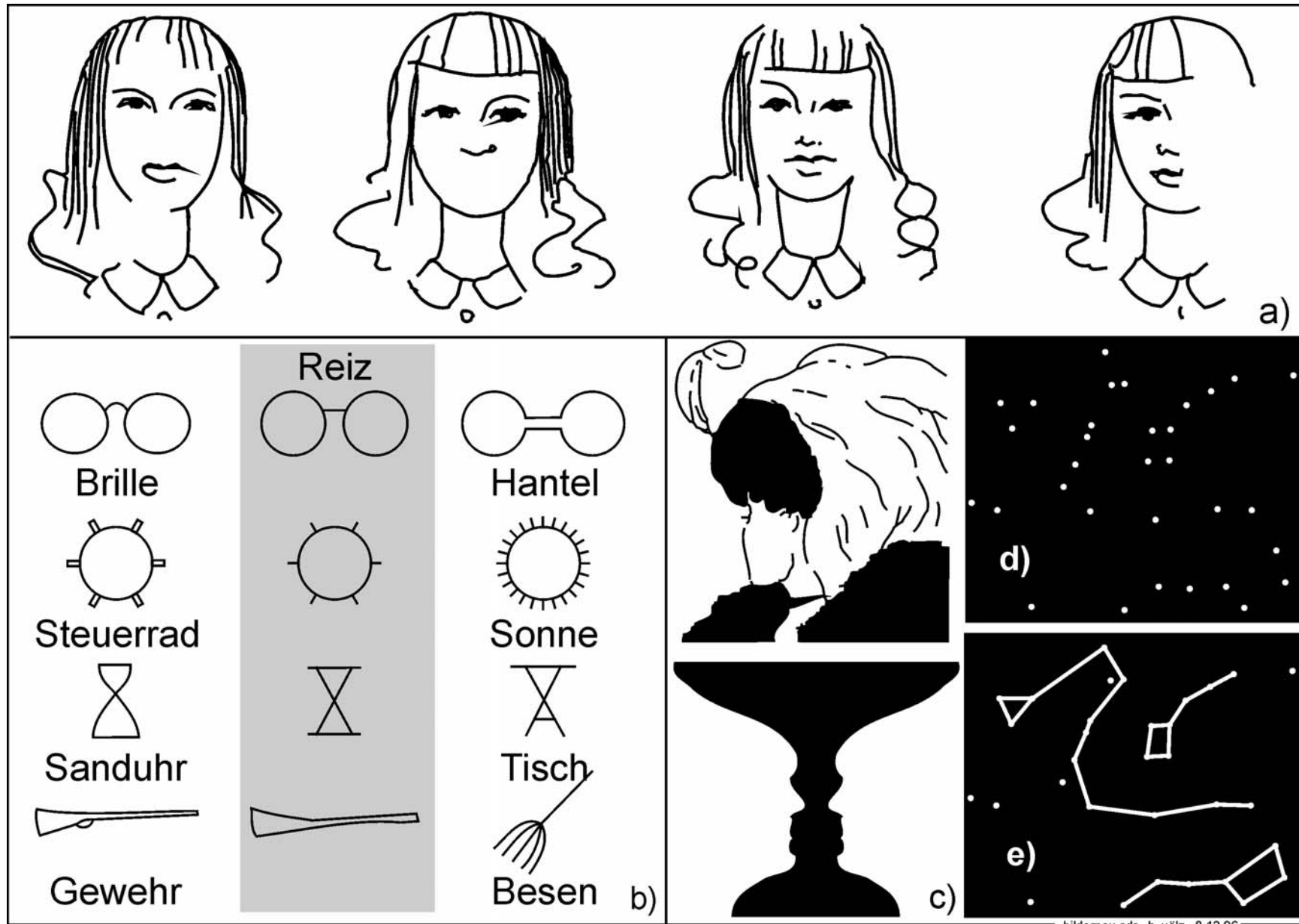
Erst danach können die verschiedenen Wandlungen in Sehen und Hören effektiv behandelt werden.
Doch zuvor ist noch der hierbei große Unterschied zwischen Bildern und Schall zu erklären
Schließlich machen aber die Bilder den Hauptteil der Betrachtung aus.
Insbesondere betreffen sie daher die Visualisierung und Sonifikation.

Hören $\Leftrightarrow$ Sehen 1

- Sehen können **fast alle Lebewesen**, Hören können nur wenige ausgewählte Wirbeltiere und Insekten!
Es ist also späte und seltene Evolution!
- Bildhaftes wird vorwiegend in der rechten **Hirnhälfte**, Sprache nur in der linken, Musik aber beidseitig (Verbindung durch Balken) wahrgenommen.
- Sehen geht über 6 **Neuronenschichten**, Hören über 7. Die beteiligte **Neuronenzahl** ist aber etwa gleich
- **Denken** erfolgt überwiegend in Begriffen $\Leftrightarrow$ nur teilweise mittels ganzheitlicher Bilder
- Unser **Gedächtnis** arbeitet wahrscheinlich effektiver (schneller) für Bild- als für Text- und Tonmaterial. Trotzdem ist das Ohr für Zeitmaßstäbe (20 statt 50 ms für die Trennung von zwei Signalen)
- **Erinnern** erzeugt kein Abbild, sondern nur Mittel, um ein ähnliches Bild zu rekonstruieren.
Menschliches Erinnern ist stets relational oder assoziativ.
Karikaturen werden doppelt schnell erkannt, Fehlendes wird ergänzt
- Sehen könnte **fraktal** erfolgen, eine Drehmultiplikation entspricht den hoch parallelen Schichtstrukturen des visuellen Kortex. Leider kann kaum jemand fraktal-rekursiv denken
Achtung! **Gesichts-Erkennung** erfolgt unabhängig von der Größe, Lage und Perspektive der Abbildung sehr schnell und effektiv.
- Optische **Halluzinationen** dürften häufiger sein als akustische. Das gilt ähnlich für optische Illusionen, Täuschungen und Paradoxien, insbesondere bzgl. 3D (Umschlag- und Escher-Bilder).
- In Bildern werden fehlende Abschnitte meist automatisch und unbemerkt ergänzt.



raumbild.odr h. vözl 13.2.98



Hören $\Leftrightarrow$ Sehen 2

- Bilder sind gespeichert und können daher ohne Veränderung weiter gegeben werden.
 - Schall ist nur als zeitlicher Ablauf wahrnehmbar. Es gibt keinen Schall der Länge $\Delta t \rightarrow 0$.
 - Dieser Unterschied macht den Umgang mit Schallwandlungen (selbst bei gespeicherten) schwierig.
 - Bilder müssen nicht gesehen werden, sie müssen dazu ins Blickfeld gelangen.
1. Bilder werden zunächst in der Gesamtheit gesehen und müssen danach an betreffenden, wichtige Stellen genauer analysiert werden, das verlangt Zeit fürs Betrachten.
 2. Schall wird eigentlich immer gehört, kann also auch als Alarmsignal für „kritische Zeitpunkte“ (Geschehen) genutzt werden.

Dieser große Unterschied ist für die praktischen Anwendungen wesentlich und bedeutet die umfangreichere Anwendung von Bildern.

Aus diesen Gründen erfolgt zunächst eine Darstellung der Möglichkeiten von Wandlungen in Bilder.

Zuvor noch einige Ergänzungen.

taub $\Leftrightarrow$ blind

Vorsicht: Aussagen zu Behinderten sind wegen „political correctness“ erschwert

- Kind erlebt bereits im **Mutterleib** die **Sprache** der Mutter
- **Spracherwerb** ist mit 2 Jahren im Wesentlichen erreicht, aber eigentlich nie abgeschlossen.
Erwerb von **Bildsehen** (Orientierung und Wiedererkennen) ist sehr viel früher abgeschlossen.
- **Von Geburt an Taube** bleiben selbst bei guter Förderung in ihrer geistigen Entwicklung etwa fünf Jahre hinter Hörenden zurück, Lernfähigkeit eventuell geringer, weil sprachliche Anreize und abstrakte Begriffe fehlen (s.u.).
- Pflegestätten/Therapeuten: **abstrakte Begriffe, wie Gott**, sind Taubstummen im Gegensatz zu Blinden kaum zugänglich, große Probleme bei der Erstkommunion (Nachweis eines hochabstrakten Gottesbegriffes).
- **Blindsein** und Blindwerden gilt meist schwerwiegender als **Taubsein** und Taubwerden.
Dennoch sind immer Blinde stärker ins gesellschaftliche Leben einbezogen.
In einigen Berufen (Übersetzer, Telefonauskunft) sind sie sogar sehfähigen Kollegen überlegen.
- **Blinde kompensieren** durch geschärften Hörsinn.
Ihre Spracherkennung ist doppelt so schnell, entdecken Fehler wesentlich rascher
- **Blind-Schachspielen**: Meister sehen nie ein Brett mit Figuren, sondern nur typische Stellungen
- Nicht sehen können $\approx$ **trennt** von **Dingen**,
nicht hören können $\approx$ trennt von anderen **Menschen**, gilt sogar für Alte.
- **Technischer Aufwand** zur Unterstützung Blinder ist unvergleichlich größer als für Taube (Stumme).

Jetzt neue Möglichkeiten der Elektronik und Computer (extremes Beispiel HAWKING)

In USA etwa 20 Millionen mit Hörbehinderung, über zwei Millionen völlig taub.

Hören - Sprechen

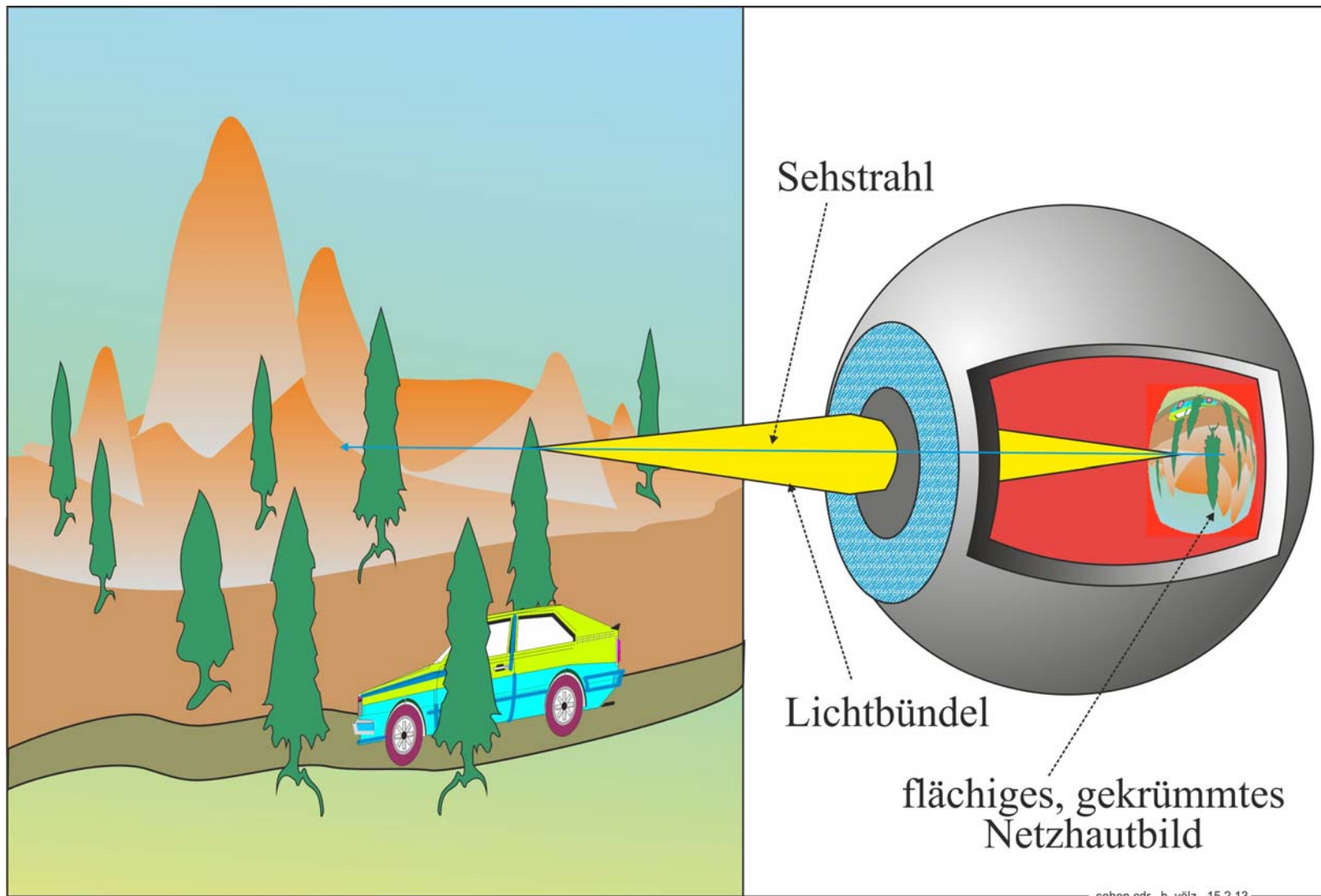
- **Taubheit** = Störungen der sensorischen Hörbahn
- **Sprach-, Schreibunfähigkeit** = Störungen der motorischen „Hör“-Bahn
- **Motorische Aphasie** = Ausfälle des II. Sprachzentrums: Kranker versteht alles, was man ihm sagt, kann sein Denken nicht in Worte fassen, weder sprechend noch schreibend (extrem: ja/nein nicht durch nicken oder Kopf schütteln. Kranke besitzen aber averbale Intelligenz, z. B. Gefühle empfinden und denken.
- **Sensorische Aphasie** = Ausfälle der sekundären Hörrinde: Kranker hört alles, kann ihm aber keinen Sinn zuordnen, dennoch auch averbale Intelligenz

Zur Musikalität

- Musikalität nur z. T. auf Hören angewiesen (rechte Hirnhälfte) Taubstumme empfinden Musik - wenn auch mit erheblicher Mühe - Rhythmus, Intensität z. T. über Vibrationen
- Spitzenschlagzeugerin EVELYN GLENNIE (*1965) ist absolut taub, spielt dennoch schwierigsten Werke der Klassik mit großen Orchestern
- Taubheit von BEETHOVEN und DVORAK, konnten problemlos weiter komponieren .
- Komponist W. SCHEBALIN Blutung im linken Schläfenlappen en, bewirkte eine starke sensorischen Aphasie, schuf aber weiterhin wertvolle Symphonien

Sehen

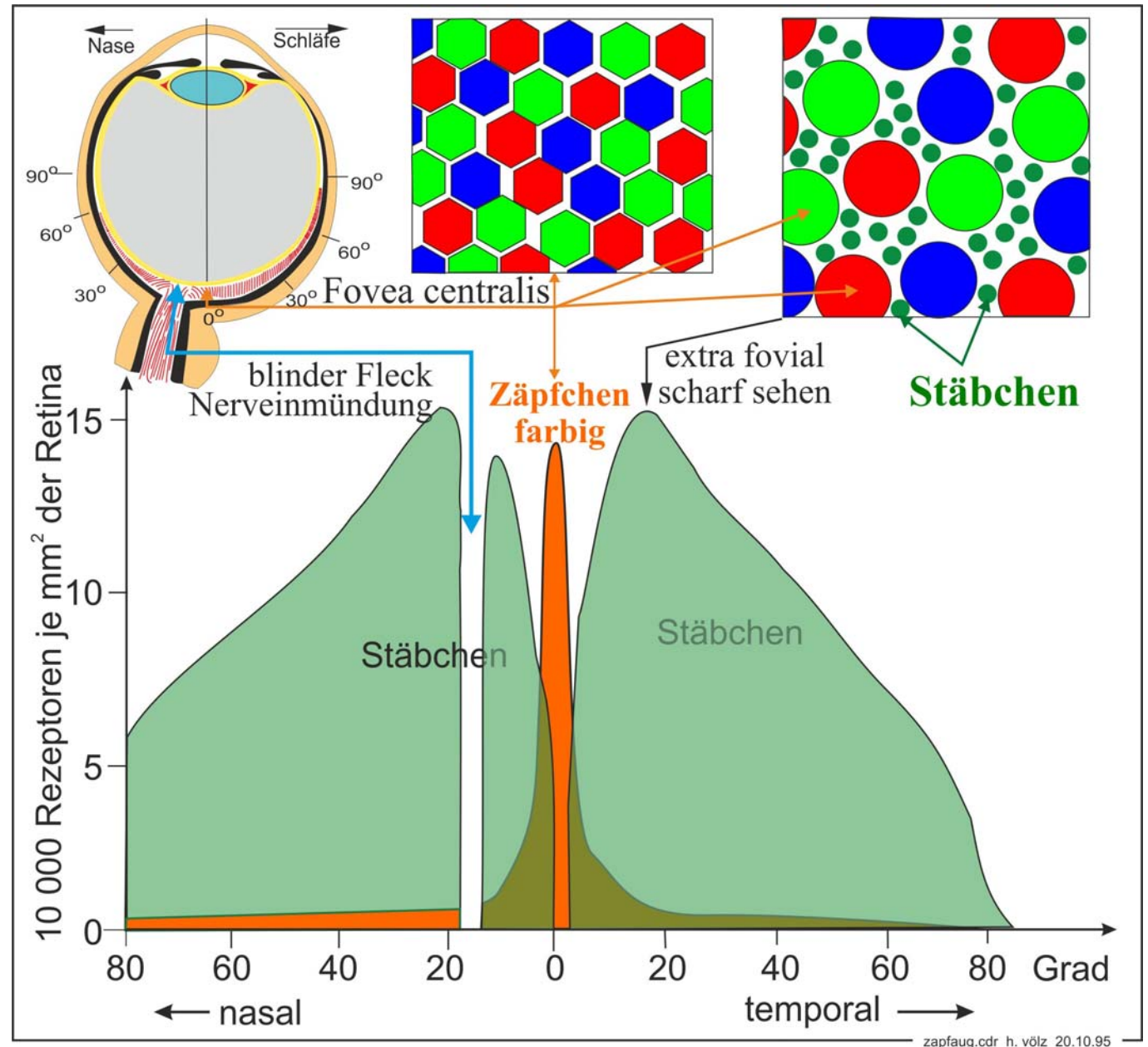
- Untere Furche des Schläfenlappens (Sulcus temporalis inferior) des visuellen System von Affen gibt es so genannte **Gesichtszellen**, die ausschließlich auf alle Gesichter reagieren. Ähnlich beim Menschen, Schädigung führt zur Unfähigkeit, Gesichter zu erkennen, obwohl Aktionspotentiale entstehen (Großmutter-Neuron). Tauben können dann nicht mehr Steine von Körnern unterscheiden.
- Schädigung in den Arealen V1 bis V5 führt zu völliger **Farbblindheit**, selbst zur Vorstellung von Farben. Ähnliches gilt auch für die Fähigkeit **bewegte Objekte** zu sehen und sich vorzustellen
- Vollständiger Ausfall des **Formen-Sehens** nie beobachtet, sie können aber schwerer zu identifizieren sein, wenn sie still stehen.
- Es gibt ein **Blind-Sehen** , hier kommt das Sehen nicht mehr ins Bewusstsein
- McCulloch 1959: im Gehirn des **Frosches** gibt es ein Gebiet für Erkennen von **Fliegen**, es existiert nur Bewegungssehen.



Die Welt wird über die Linse auf die Netzhaut abgebildet. Dabei entstehen natürlich Fehler

Das Auge hat an unterschiedlichen Winkeln verschiedene Auflösung und Farbempfindlichkeit

Das zeigt sich in der ungleichmäßig verteilten „Pixelstruktur“.



Sehen mit dem Auge

Unser Blick kann je nach den Bedingungen **unterschiedlich orientiert** sein.

Bei einem Überblick zur **Umwelt** konzentrieren wir uns auf das, was alle Sehzellen erfassen.

Betrachten wir etwas genauer, so konzentrieren wir uns auf das, was die Zäpfchen der Fovia centralis erfassen.

Hier existiert die höchste und farbige Winkelauflösung unseres Auges.

Bei sehr dunklen Objekten (Dunkelkammer usw.) müssen wir dazu extra fovial sehen (lernen).

Wenn wir **Bilder ansehen**, müssen sie beides ermöglichen.

Mit einem zentralen Überblick betrachten wir zunächst das gesamte Bild. Einen Teil davon mit beiden Augen. erst danach analysieren wir Gebiete von Interesse mit der höheren und farbigen Auflösung der fovea cetrales.

Ein Bild muss daher eine Pixelfeinheit besitzen, die groß und überall gleich ist.

Das führt zur konstanten Pixeldichte (Pixel/mm²) im Bild.

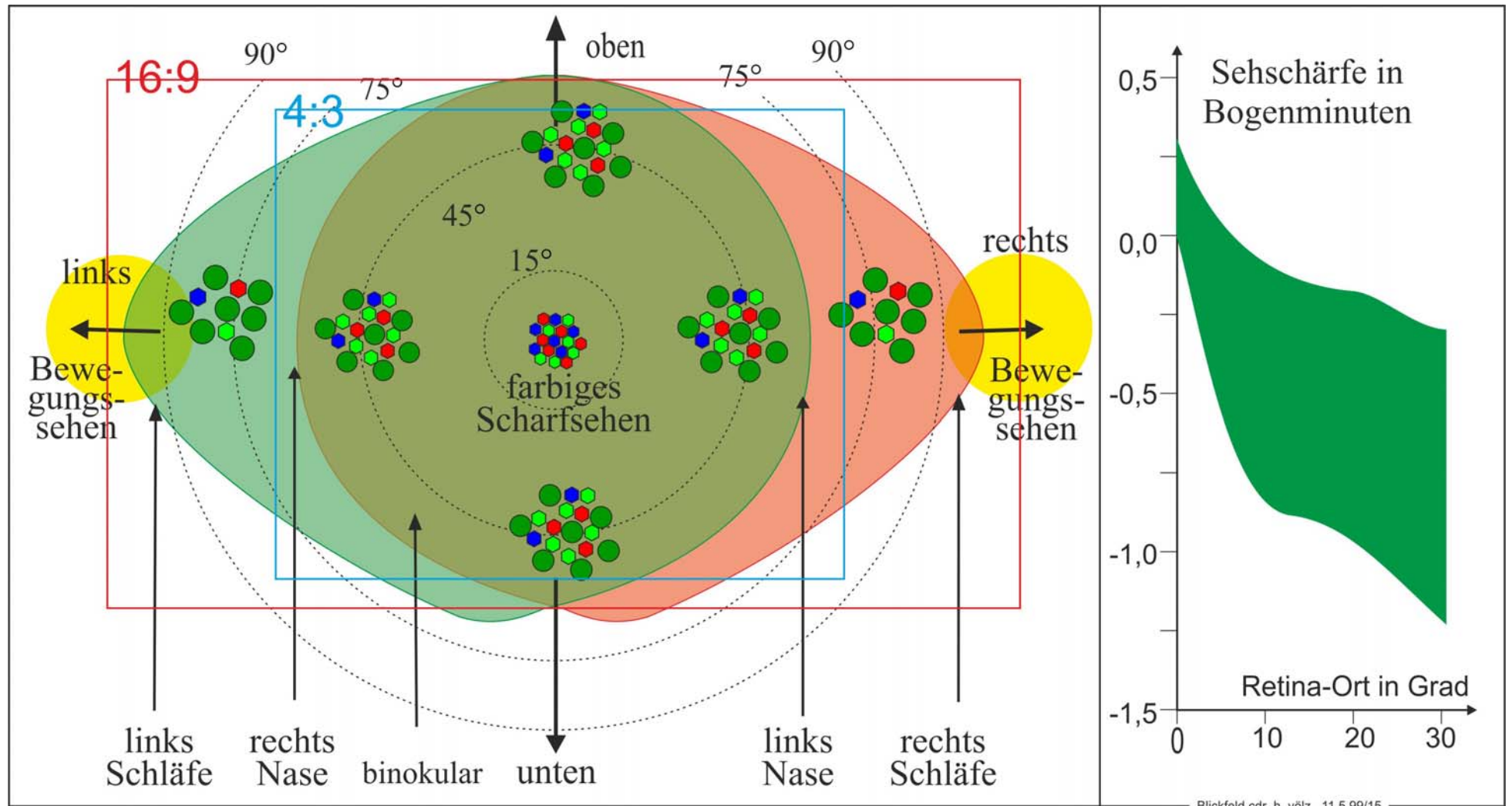
Daher sollten Bilder zum Betrachten ein **quadratisches Raster** mit möglichst hoher Auflösung besitzen.

Ja derartige Bilder sind faktisch die Grundlage aller „flächigen“ Bilder.

Am **Rande unseres Gesichtfeldes** sehen wir eigentlich nichts (Arme ganz seitlich weggestreckt).

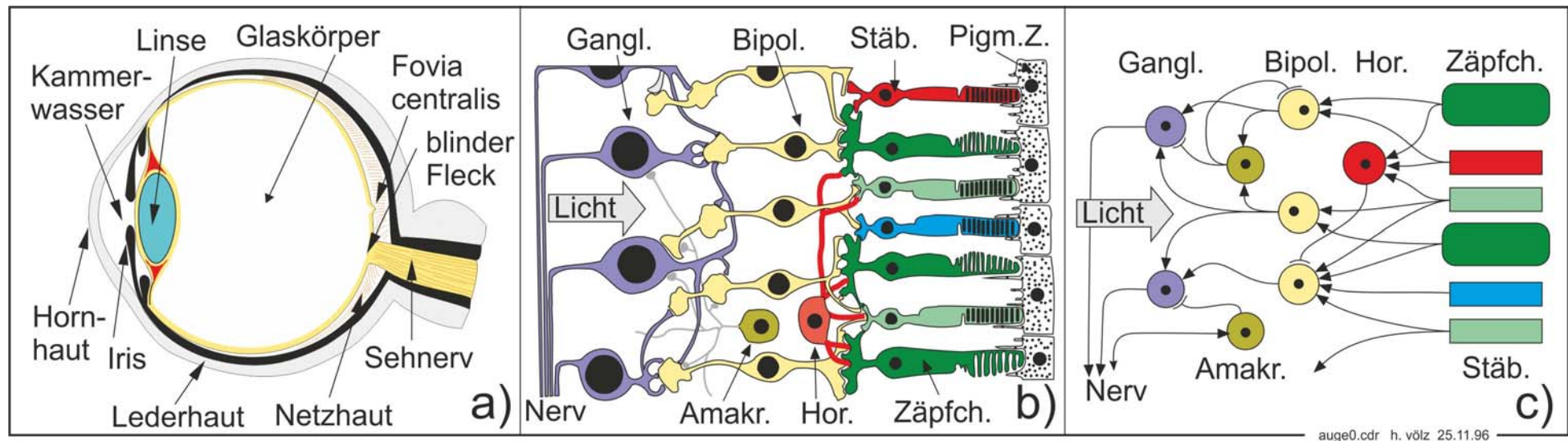
Doch wenn sich dort etwas bewegt, erscheint es plötzlich.

Hier liegt der Grund, dass vom ursprünglichen 3:4- zum 9:16-Format übergegangen wurde.



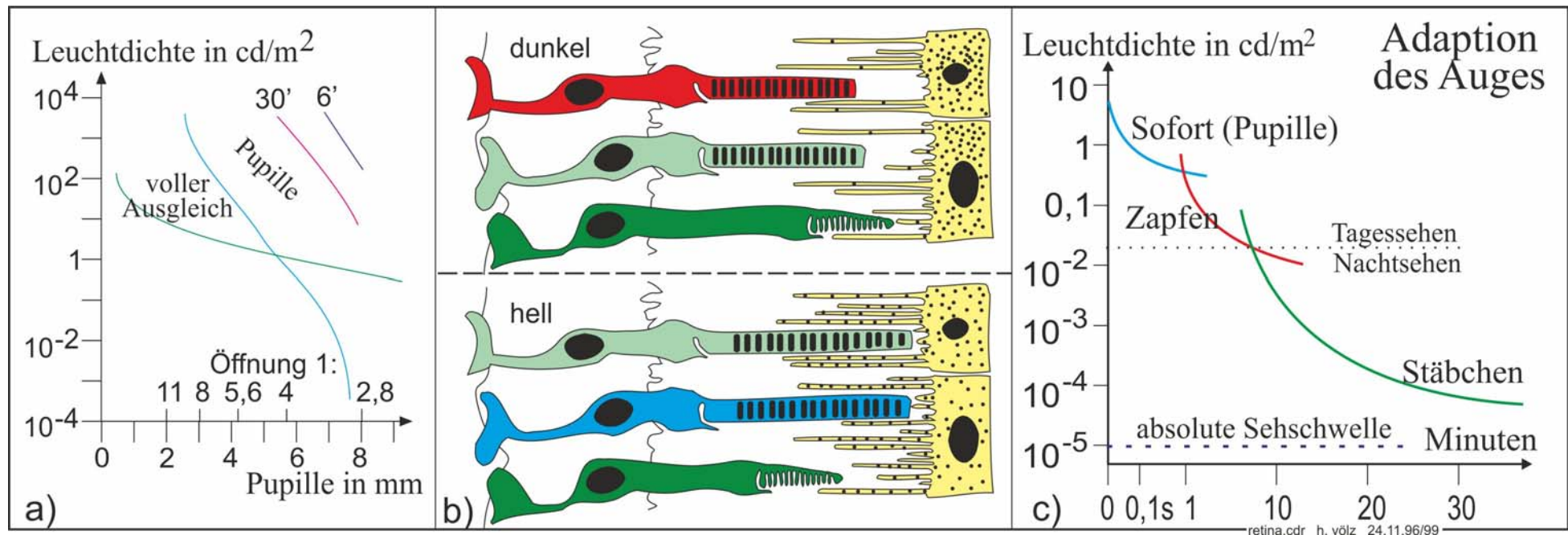
Verarbeitung der Signale von den Sehzellen

Das was die Sehzellen abgeben wird nicht unmittelbar wahrgenommen.
Zunächst erfolgt eine hochkomplexe Signalverarbeitung z. T. bereits in der Netzhaut.
Sie setzt sich dann u. a. über drei Neuronen-Schichten im Hinterhirn fort.



Der interne, neuronale Aufbau des Auges

Helligkeit Adaption



Das Auge muss einen Helligkeitsbereich von $1:10^8$ erfassen

Die Helligkeit wird dazu durch 3 Varianten der Adaption verwirklicht.

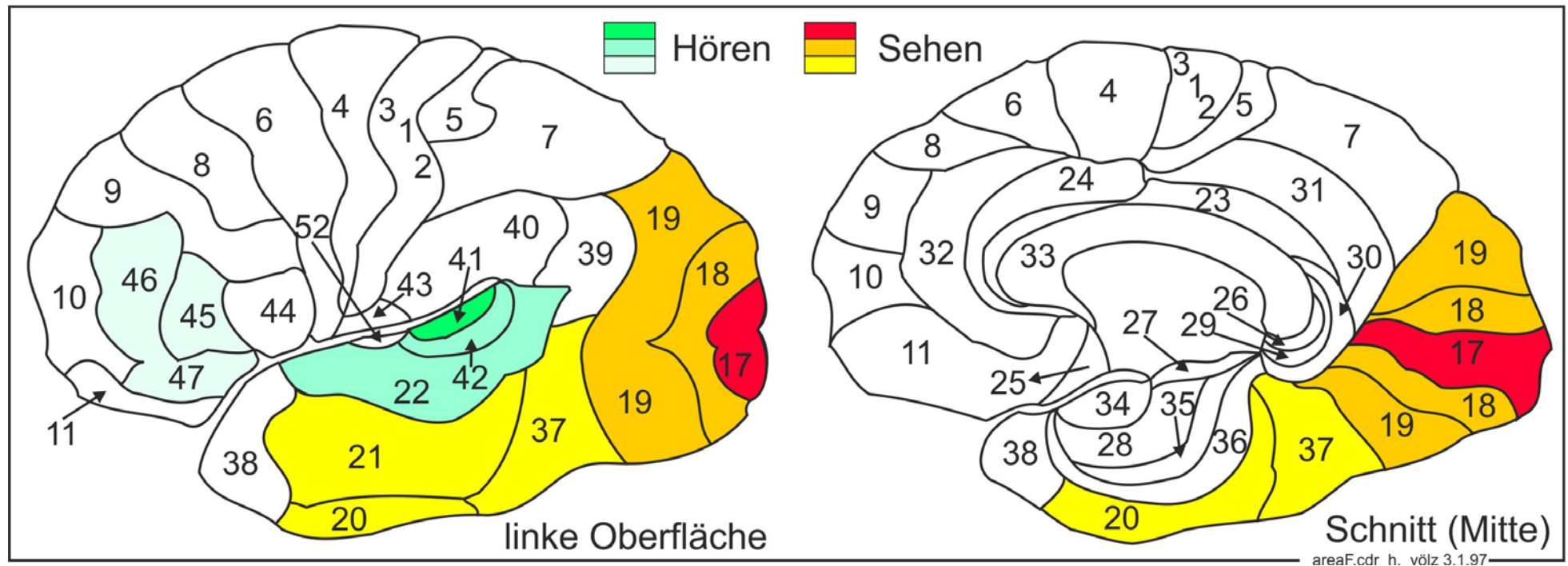
Es existieren die sehr schnelle Veränderung der Pupillengröße und

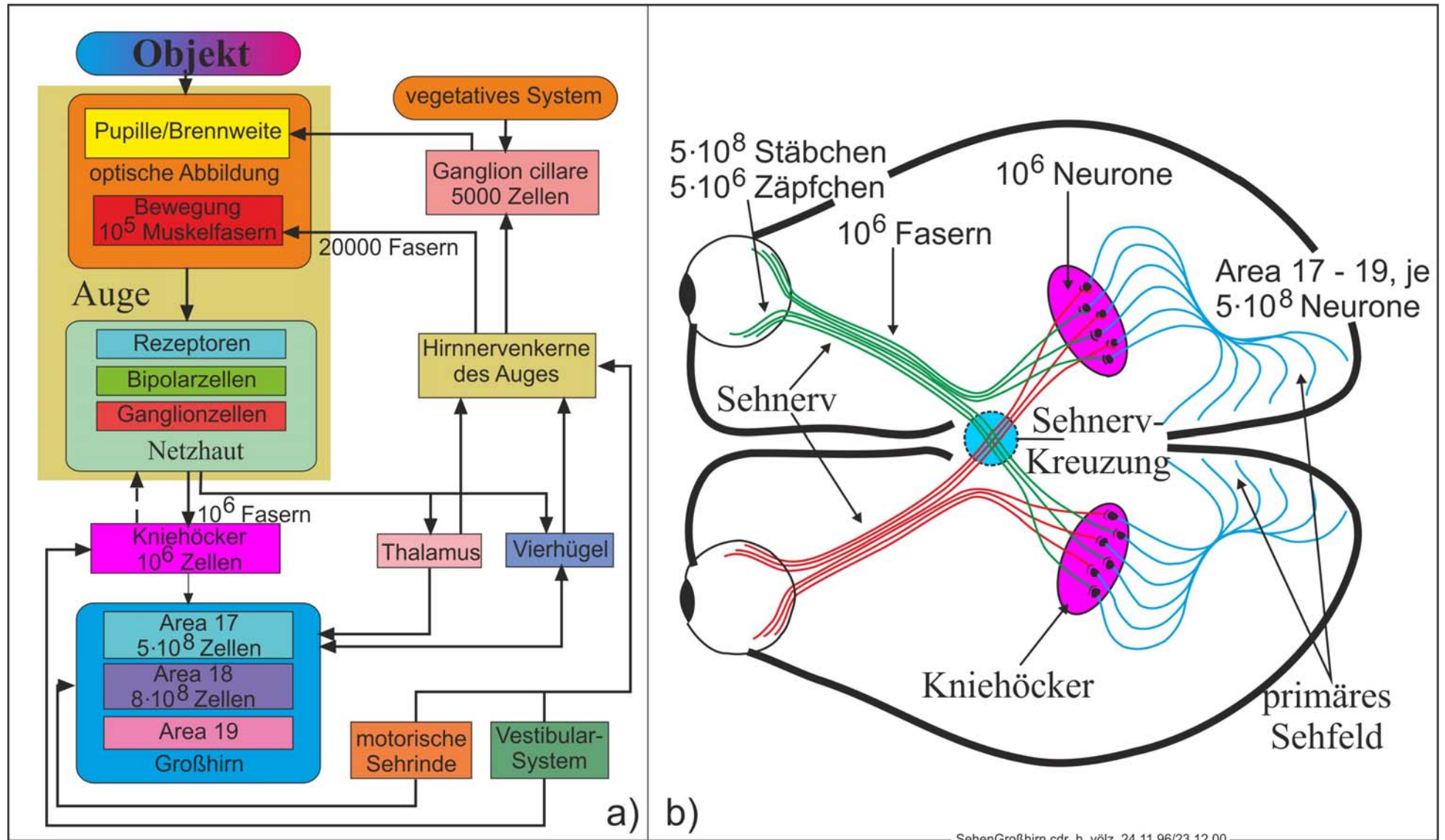
die recht langsame Veränderung durch teilweise Verdeckung der Sehzellen.

Dabei reagieren die Zäpfchen bei hellen Tagessehen und die Stäbchen bei dunklerem Licht (Nachtsehen)

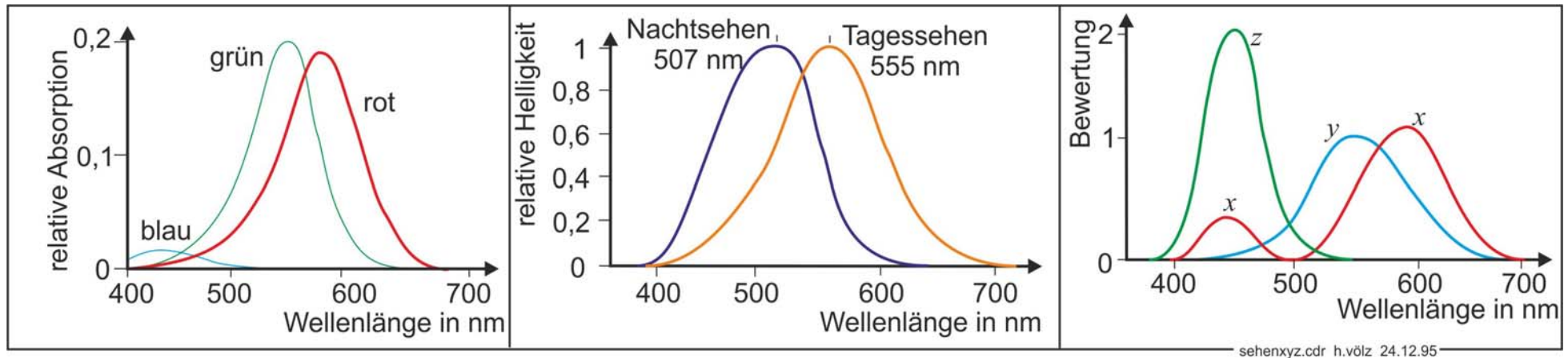
Verarbeitung des Sehens

Sie erfolgt höchst komplex in mehreren Teilen des Gehirns.

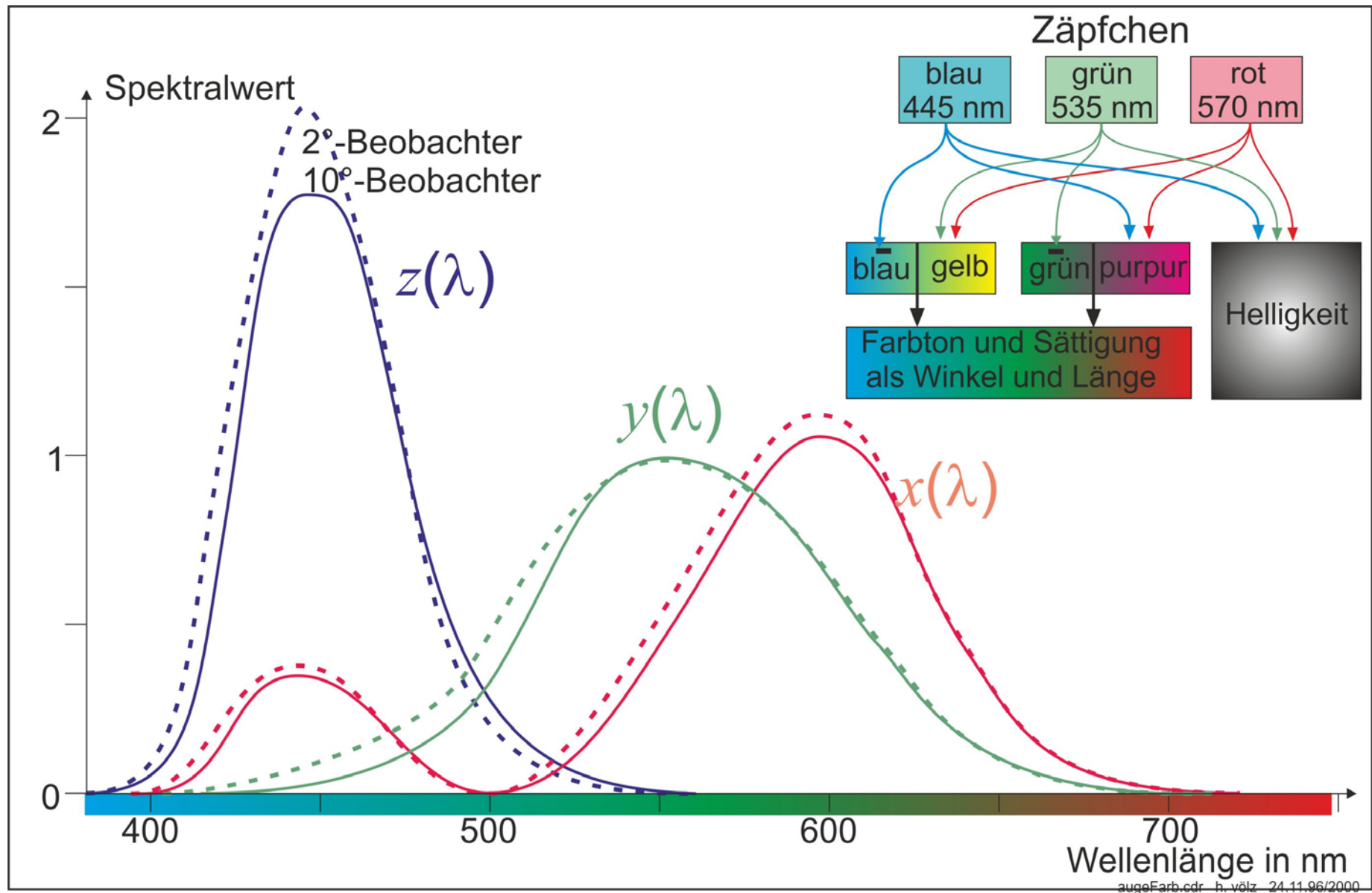




Farben sehen



Die Zäpfchen haben unterschiedliche Absorptionen im sichtbaren Spektrum. Ihre Signale werden in komplexer Verschaltung zu den **Farbwahrnehmungen** verknüpft. Die empfindlicheren **Stäbchen** besitzen eine andere Grün-Absorption, daher unterscheiden sich **Tag- u. Nachtsehen**. Die subjektive Wahrnehmung der Farben wird über **drei Bewertungskurven** x, y, z festgelegt. Dabei gibt es unterschiedliche Normierungen mit der Summe 1 für **2°- und 10°-Sehen**. Für das **Farbdreieck** genügen wegen der Normierung $x+y+z=1$ **nur** die Werte x und y. Weitere Details in Völz: Mensch-Maschine-System.

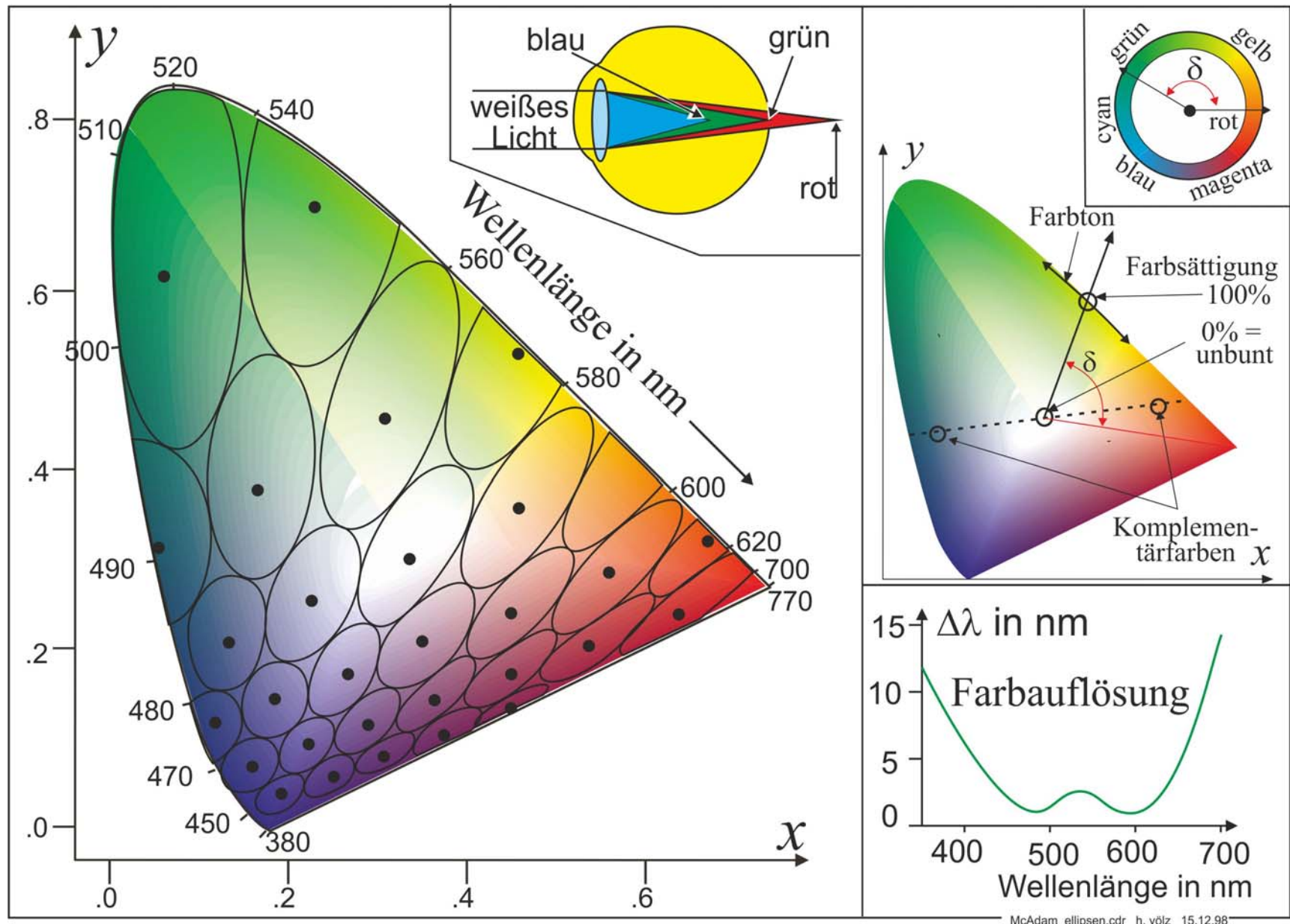


Das **Farb-
dreieck**
mit den
MCAdams-
Ellipsen

Die **Brenn-
punkte** der
drei Haupt-
farben

Farborte
als
Zusammen-
setzungen
aus den
**Spektal-
farben**

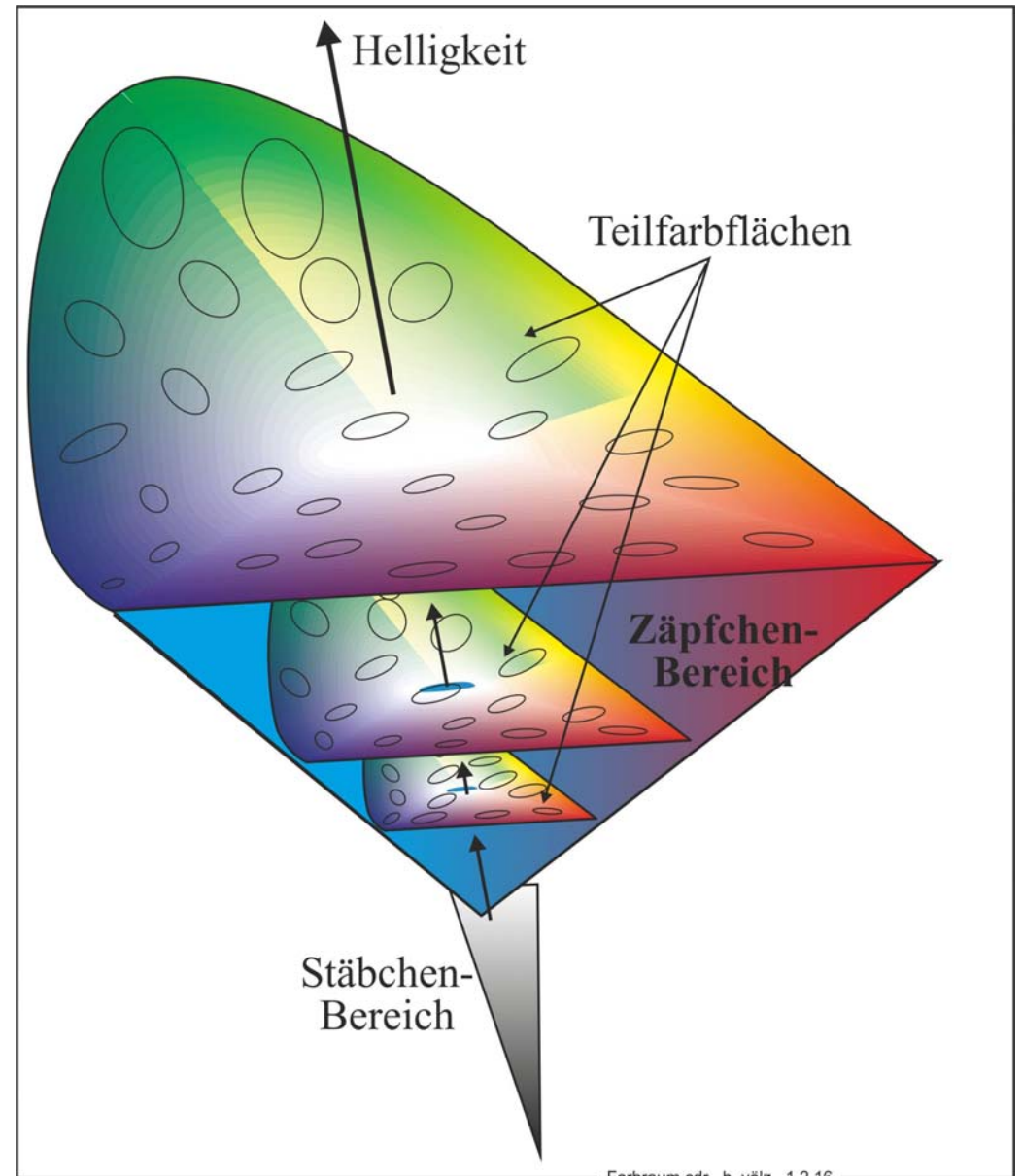
Die Farb-
auflösun-
gen



Das übliche Farbdreieck gilt für hohe bis mittlere Helligkeit. Hier unterscheiden wir 600 Helligkeiten, bei maximalen Kontrast 1:200, 150 gesättigte Farbvalenzen und 20 Sättigungswerte, aber nur 10 in Richtung grün.

Wenn die Beleuchtung geringer wird, gibt es weniger McAdams-Ellipsen (Farben). So nimmt die Anzahl der unterscheidbaren Farb-Helligkeitswerte schrittweise ab.

Schließlich sind nur die Stäbchen aktiv. Dann werden nur noch graue (Nicht-) Farben wahrgenommen und schließlich gibt es nur noch schwarz, also nichts Sichtbares.



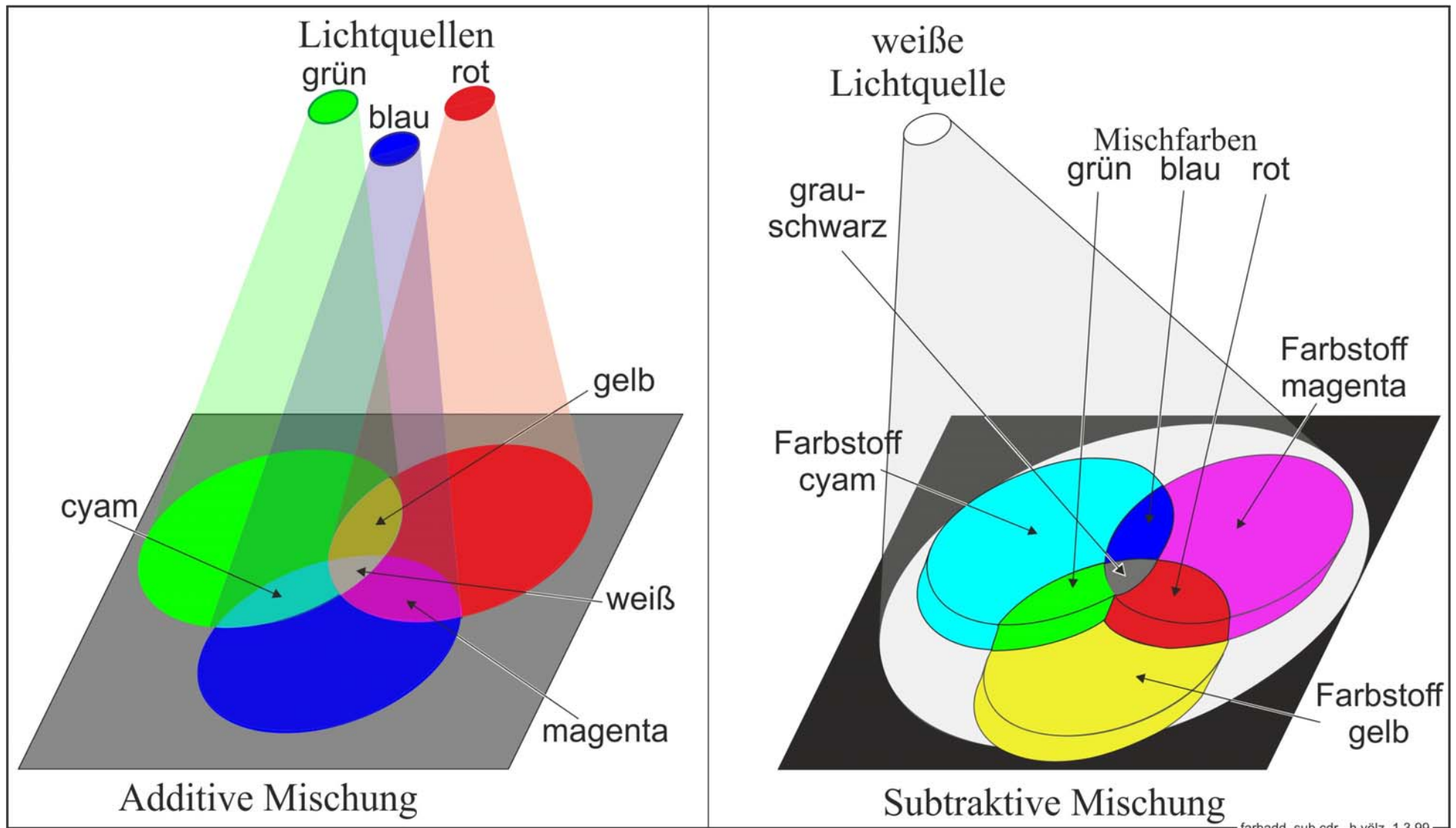
Farbraum.cdr h. völg 1.2.16

Farbwiedergabe

Eine Farbwiedergabe von Bildern hängt von der Beleuchtung **und** dem beleuchteten Material ab.
Die Beleuchtung kann mit weißem oder farbigem Licht erfolgen.
In jedem Fall absorbiert und reflektiert das Material davon Spektralanteile entsprechend seiner „Eigenfarbe“
Erst die Kombination beider bewirkt den subjektiven Farbeindruck

Der Grenzfall ist die Beleuchtung mit weißem Licht.
Bei über- oder unmittelbar nebeneinander liegenden Farbstoffen addieren sich ihre Substraktion und es ergibt sich die **subtraktive Farbmischung**

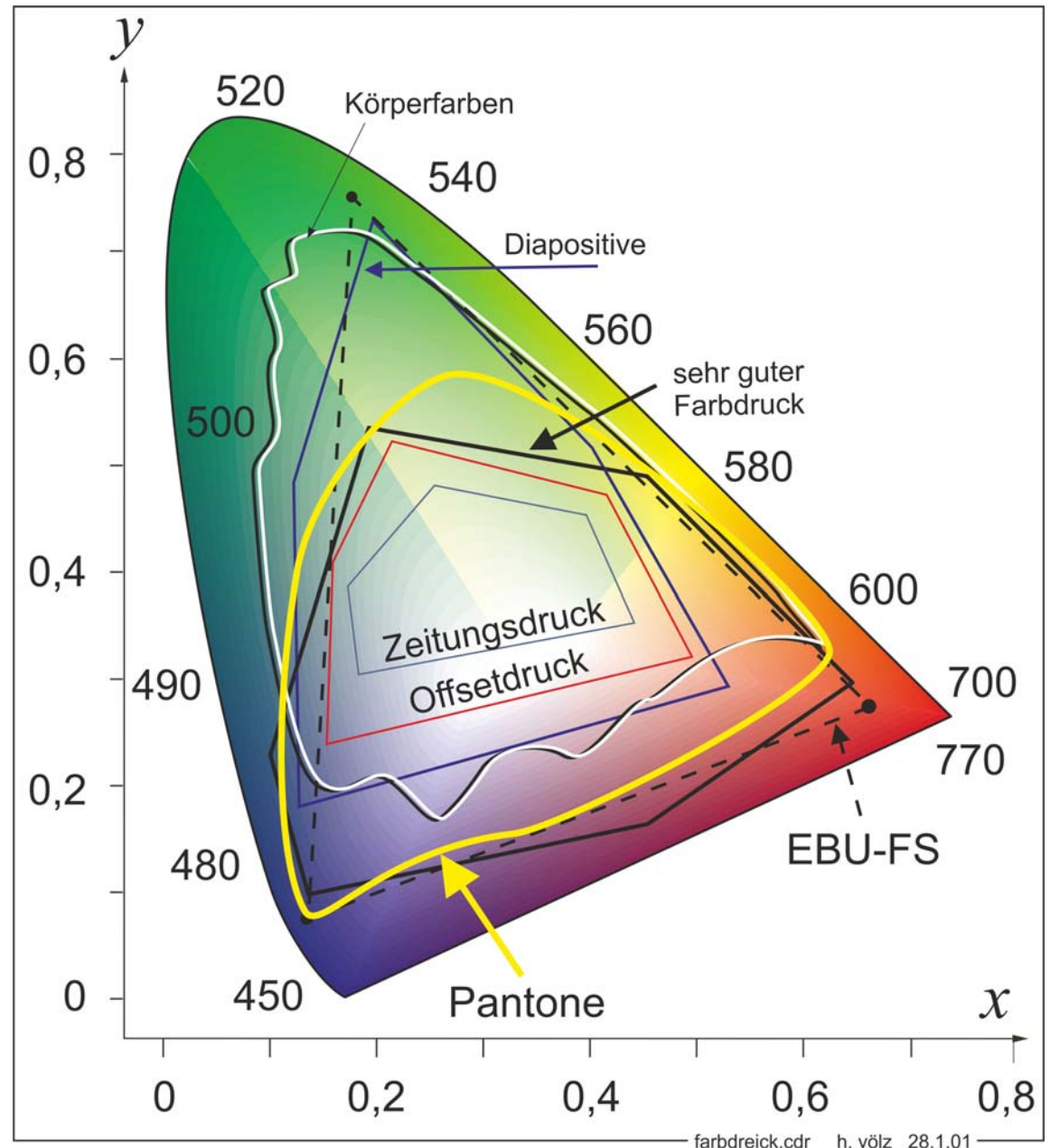
Die **additive Farbmischung** entsteht wenn sich die farbigen Lichtquellen auf weißem Papier addieren
in allen Fällen kann technisch immer nur ein Teil des Farbdreiecks wiedergegeben werden



Beispiele für den erreichbaren Teil des Farbdreiecks bei verschiedenen Wiedergabeverfahren

Additive Farbmischung geht von den drei „punkten der Lichtquellen aus und erzeugt ein Dreieck

Die subtraktive Farbmischung ist komplexer und erzeugt meist ein Fünfeck, das überwiegend von den Farbstoffen und etwas vom „Papier“ abhängt.



Das Gehör

Sehen können **fast alle Lebewesen** (nicht nur Tiere, auch Pflanzen richten ihre Blätter zum Licht aus)

Hören können nur wenige ausgewählte Wirbeltiere und Insekten!

Es ist also späte und seltene Evolution! Hörorgane sind dabei extrem unterschiedlich.

Die Qualle „hört“ das Meer über die Resonanz ihres pizartigen Oberteils.

Insekten haben ihr vibrationsempfindliches Hörorgan in den Beinen.

Besonders leistungsfähig sind das Wirbeltierohr und damit auch unser Gehör.

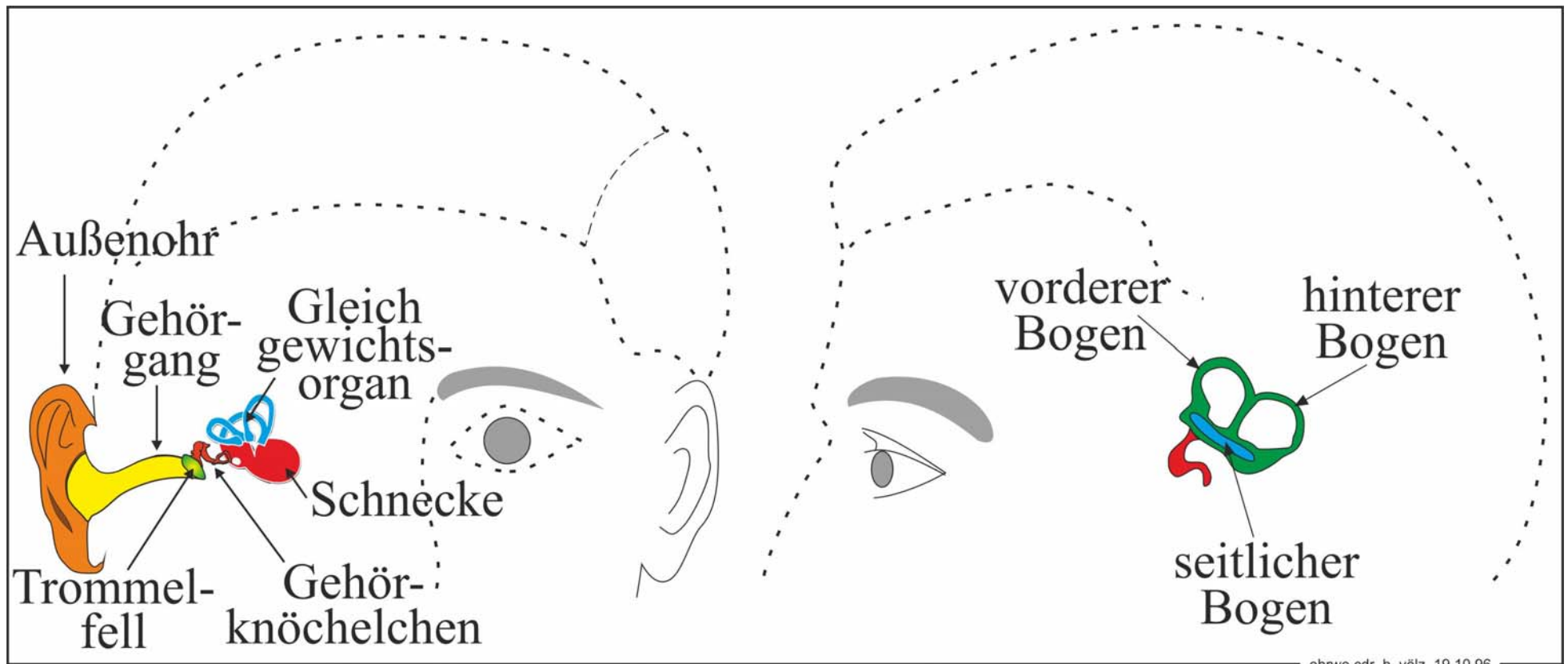
Seine Lage im Kopf zeigt das folgende Bild. Es besteht aus

- Ohrmuschel = **Außenohr**
- **Gehörgang** an dessen Ende sich das **Trommelfell** befindet
Er besitzt einen Durchmesser von 0,9 cm und ist etwa 2,5 cm lang
- 3 **Gehörknöchelchen**: Hammer (Malleus, 25 mg), Amboss (Incus, 25 mg) und Steigbügel, (Stapes 2,5 mg)
sie bilden das eigentliche **Innenohr** mit dem hermetisch abgeschlossenen Hohlraum=Paukenhöhle (2 cm^3).
Es ist nur über die Eustachische Röhre mit dem Mundraum verbunden.
Sie ist fast immer mit einem nicht willkürlich zu betätigenden Muskel verschlossen.
- Der **Schnecke** (cochlear) mit den Sinneszellen

Unmittelbar mit dem Gehör (der Schnecke) ist das Gleichgewichtsorgan mit den drei Bogengängen verbunden.

Alle vier sind mit einer gemeinsamen Flüssigkeit, der Lymphe gefüllt

, Amboß und Steigbügel



Schallverarbeitung

Der Schall wird nur relativ wenig durch die Ohrmuschel beeinflusst

Die erblichen 2 oder 3 Faltungen haben nur bei hohen Frequenzen einen geringen Einfluss auf die Richtwirkung.

Der etwa 2,5 cm lange Gehörgang wird durch das Trommelfell abgeschlossen.

Er wirkt wie eine gedackte Pfeife mit einer Resonanzfrequenz von etwa 4 kHz ($\lambda/4$) (Bild g).

Alle Frequenzen tiefer als etwa 2 kHz werden dagegen fast unverändert zum Trommelfell übertragen.

Zu den höheren und tieferen Frequenzen ist die Anpassung zum Trommelfell schlechter.

Schall wird dann reflektiert. Bei 100 Hz gehen so 20 dB verloren.

Es wird dann nur noch 1 % der möglichen Schallenergie vom Trommelfell aufgenommen und weitergeleitet.

Das Trommelfell besitzt eine Fläche von ca. 70 ($9,2 \times 8,5$) mm²

Es schwingt nicht wie eine Membran, sondern kippt starr als Ganzes, fast wie eine Tür.

Hierdurch nimmt es dreimal soviel Energie als bei einer Membranschwingung auf.

Seine Schwingung wird vom angewachsenen Hammer zum Amboss und Steigbügel drehend weitergeleitet.

Zur Anpassung der Wellenwiderstände von Luft und Lymphe erfolgt dabei eine Hebelübersetzung von 24:1.

Die Gehörknöchelchen drehen sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt.

Sie übertragen schließlich den Schall zum ovalen Fenster (3,2 mm²).

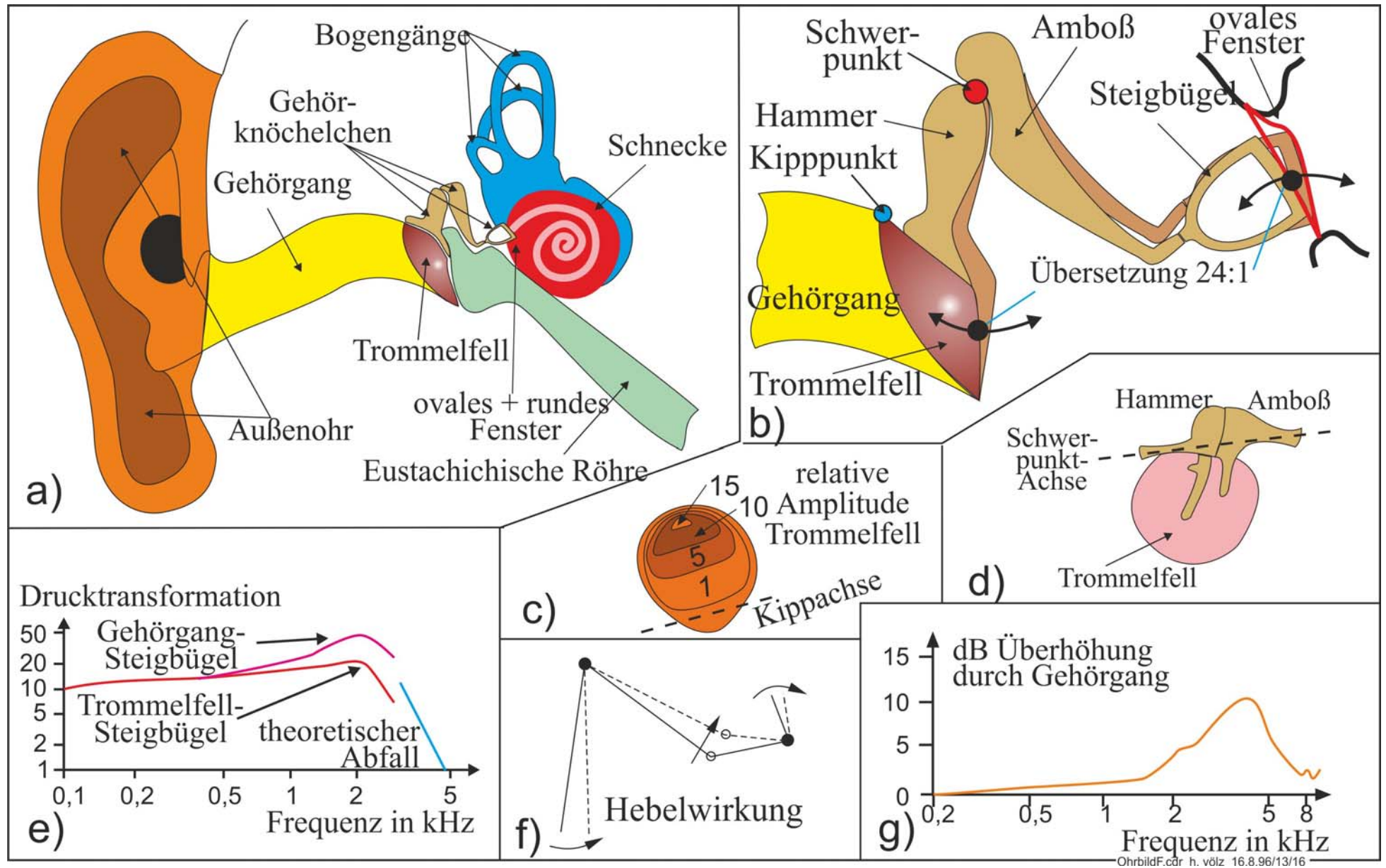
Nur dadurch ist das Gehör unempfindlich gegenüber Bewegungen des Kopfes! sowie Hüpfen und Springen.

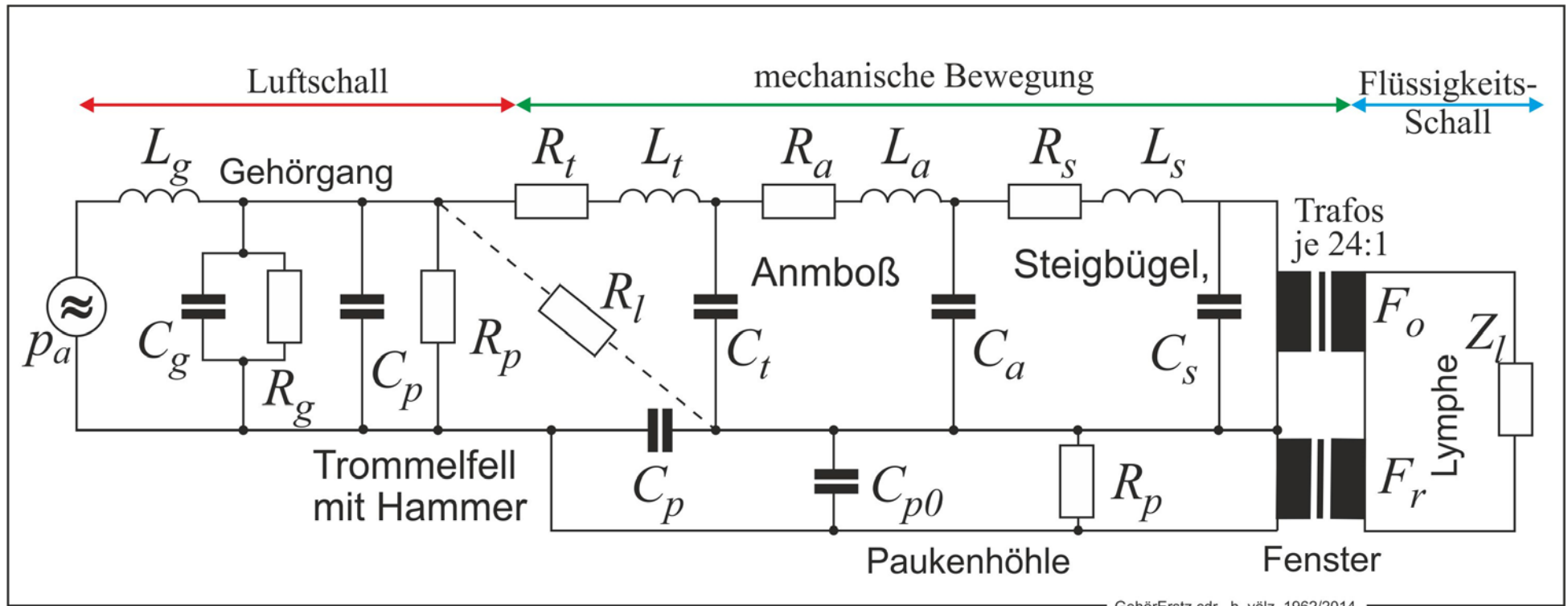
So wird die höchstmögliche Empfindlichkeit erreicht (weitere Steigerung hätte Blutrauschen hörbar gemacht!)

Durch falschen Druck im Mittelohr wird das Trommelfell seitlich verbeult, Folge Hörverluste.

(Ausgleich über die Eustachische Röhre (Landen und Starten in Flugzeugen).

Für den gesamten Übertragungsweg vom Außenohr zum ovalen Fenster gibt es ein elektrisches Ersatzschaltbild.

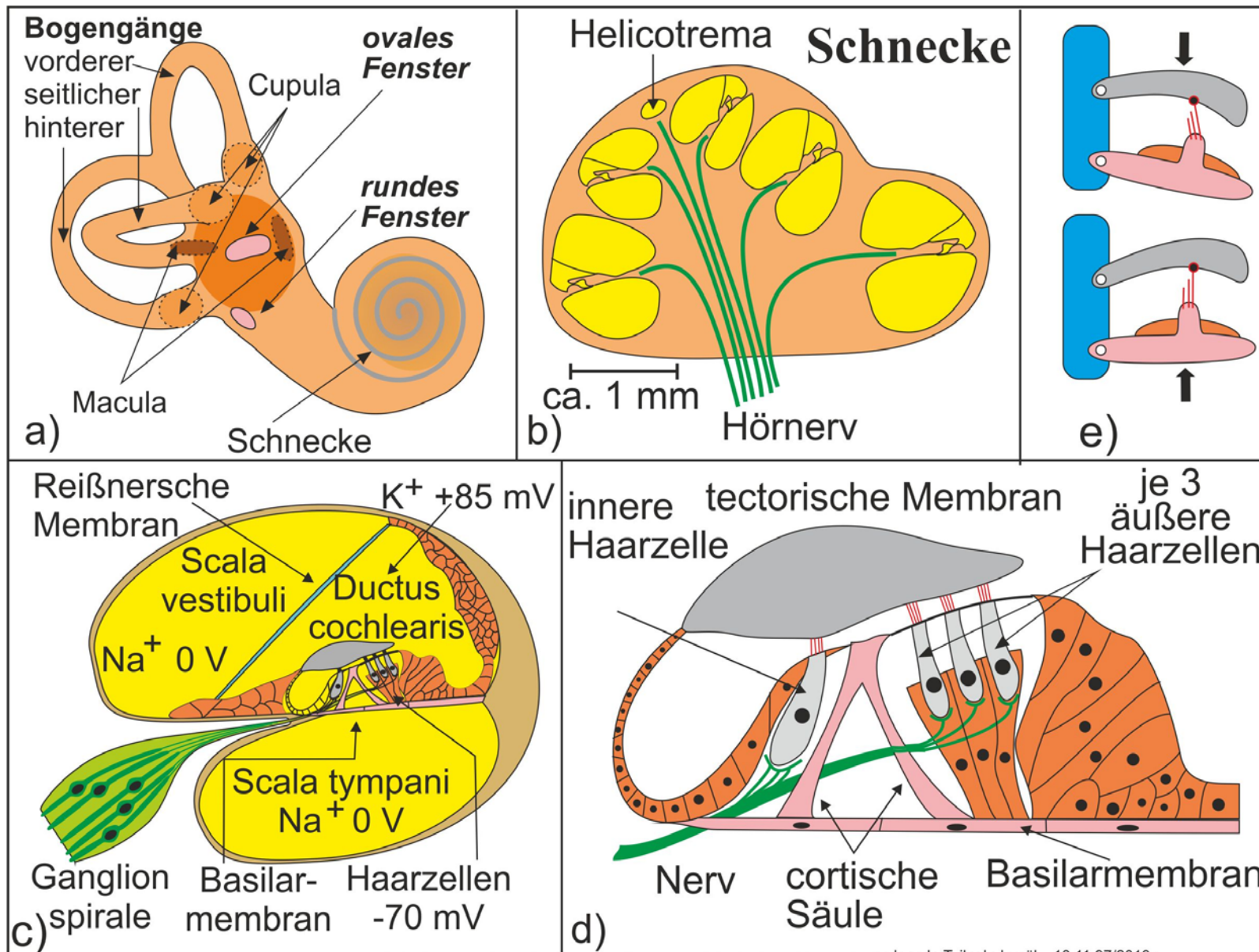




GehörErstz.cdr h. vözl 1962/2014

Funktion der Schnecke

Der Steigbügel wirkt über das ovale Fenster auf die Lymphe der Schnecke ein (a).
Ein teilweiser Ausgleich geschieht über das runde Fenster zur Paukenhöhle hin.
Die 2,7 Windungen der Schnecke enden am Helicotrema (b).
Abgewickelt beträgt ihre Länge 32 mm.
Die Röhre der Schneckenwindungen ist systematisch geteilt (c).
Beide Abschnitte sind jedoch am Helicotrema verbunden.
Die gallertartige Basilarmembran ist in der Querrichtung durch ca. 25 000 Fasern verstärkt.
Ihre Länge vom runden bzw. ovalen Fenster bis zum Helicotrema beträgt etwa 32 mm.
Ihre Breite nimmt dabei von 40 μm auf 500 μm (Helicotrema) zu,
Die Steifigkeit etwa exponentiell von 10^{-7} auf 10^{-5} cm/dyn.
Der Schall bewegt die Basilarmembran, auf der sich das cortische Organ befindet (d).
Die Reißnersche Membran (c) ist für den Schallverlauf unwesentlich, nur elektrolytisch wichtig.
Insgesamt existieren längs der Schneckenröhre ca. 3500 Reihen von je 1 inneren und 3 äußeren Haarzellen.
Die empfindlichen Fäden der Haarzellen sind mit der tectorischen Membran verwachsen.
Durch die unterschiedliche Bewegung von tectorischer und Basilarmembran werden sie verbogen (e).
Das erzeugt Aktionspotentiale in den Nervenzellen, die zum ganglion spirale weitergeleitet werden.



Wellengleichung zum cortischen Organs

Das schematische Bild dient der Veranschaulichung des Geschehens in den Windungen der Schnecke.
 Die röhre ist mit der kompressiblen Lymphe gefüllt.
 Der Schall verbiegt vom oberen teil ausgehend die Basilarmembran.
 Infolge ihrer sich stak ändernden Steife gibt es im frequenzabhängigen Bereich dx ein Ende der Verbiegung.
 Die Berechnung ist sehr kompliziert und durch die folgende partielle Differential-Gleichung bestimmt

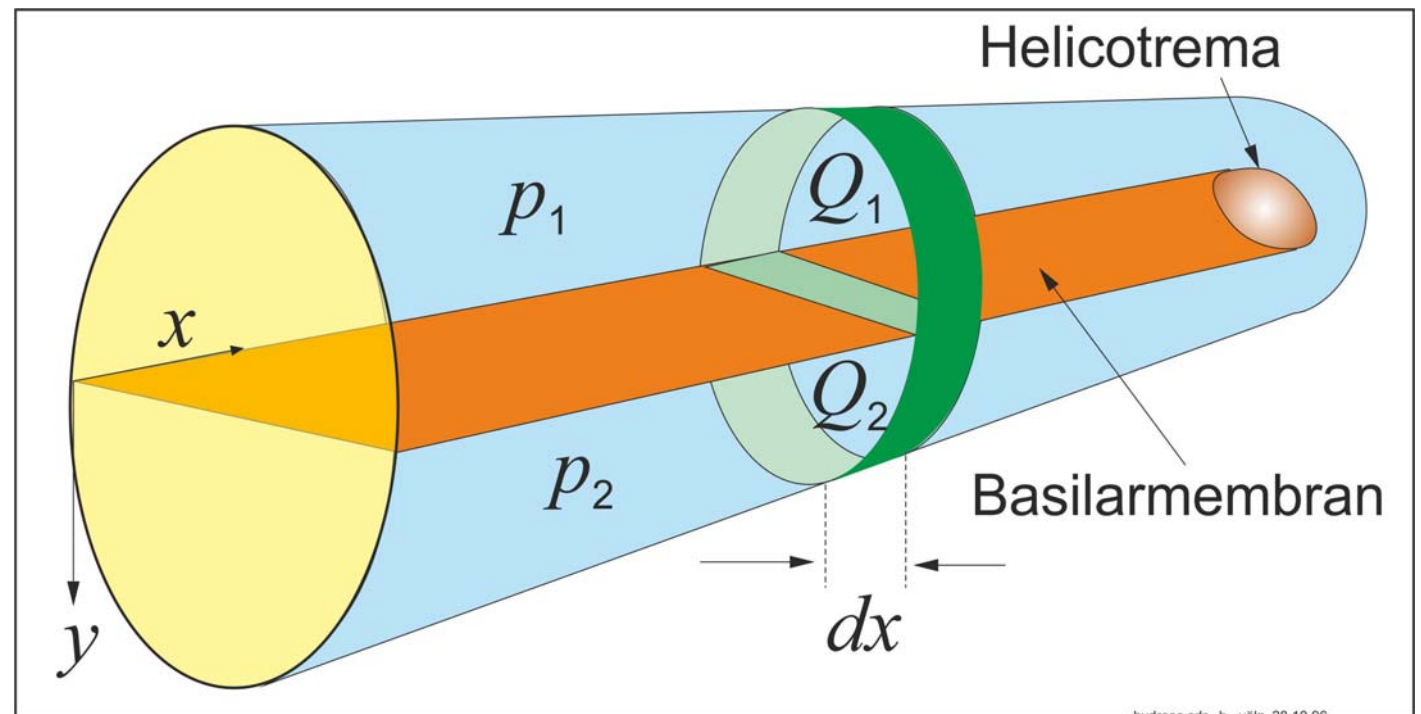
$$\frac{\partial(Q_i, v_{i1})}{\partial x} dx + \frac{Q_i dx}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + v b dx = 0.$$

Für die weitere Analyse:

Ranke, O. F. u. Lullis, H.:
 Gehör - Stimme - Sprache.
 Springer-Verlag, Berlin -
 Göttingen - Heidelberg 1953

und mein Buch Mensch-
 Maschine-System

Wesentliche Ergebnisse zeigt
 das folgende Bild



Geschehen in der Schnecke

Die Berechnungen hierzu sind sehr komplex, lassen sich aber veranschaulichen.

Der Steigbügel löst am ovalen Fenster einen Wirbel aus, der sich über der Basilarmembran ausbreitet.

Je nach der Frequenz durchwandert er die Basilarmembran und läuft zum Ausgleich zum runden Fenster (a).

Das Wellenbild auf der Basilarmembran zu einer ausgewählten Zeit zeigt Bild d.

Es ändert sich mit der Zeit gemäß d) und erzeugt so die grüne Hüllkurve.

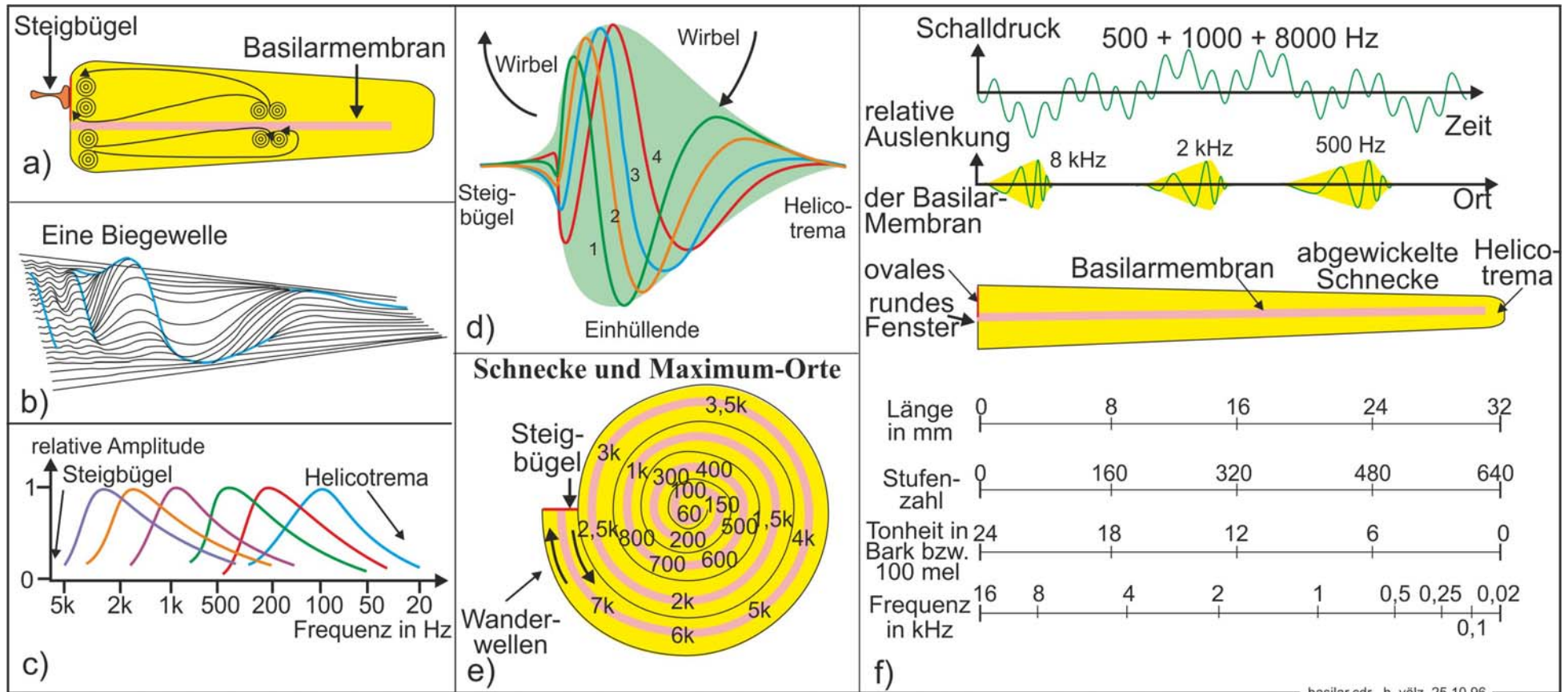
Der Ort für die Durchwanderung der Basilarmembran ist von der Frequenz abhängig (c).

Für hohen Frequenzen in der Nähe des Steigbügel für Tiefe beim Helicotrema.

Dadurch werden zuerst die Hörzellen für hohe Frequenzen geschädigt.

Die entsprechende Lage in der Schnecke zeigt Bild e).

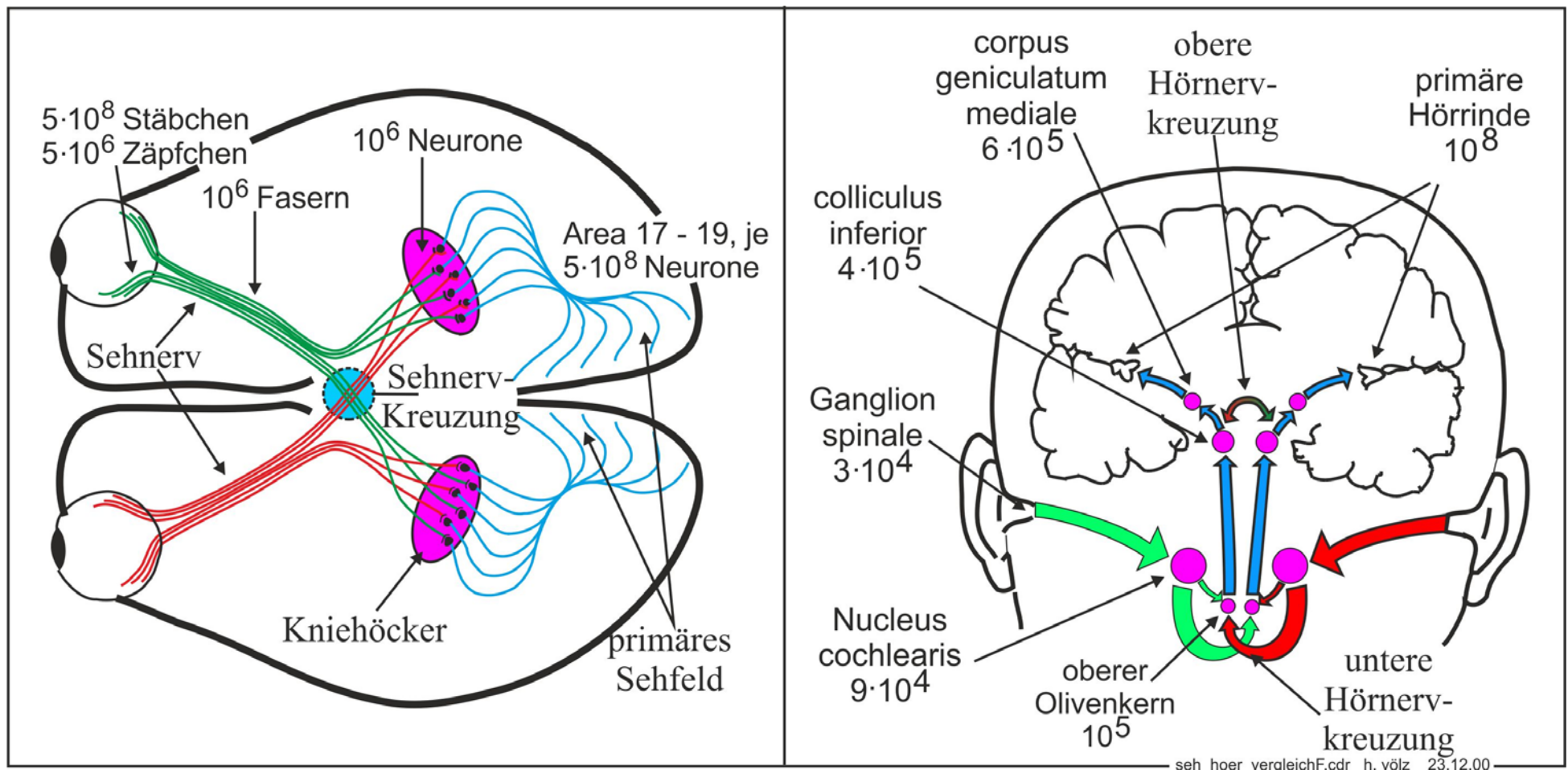
Bei mehreren Frequenzen weisen gleichzeitig mehrere Stellen ein Schwingungsmaximum auf (f).



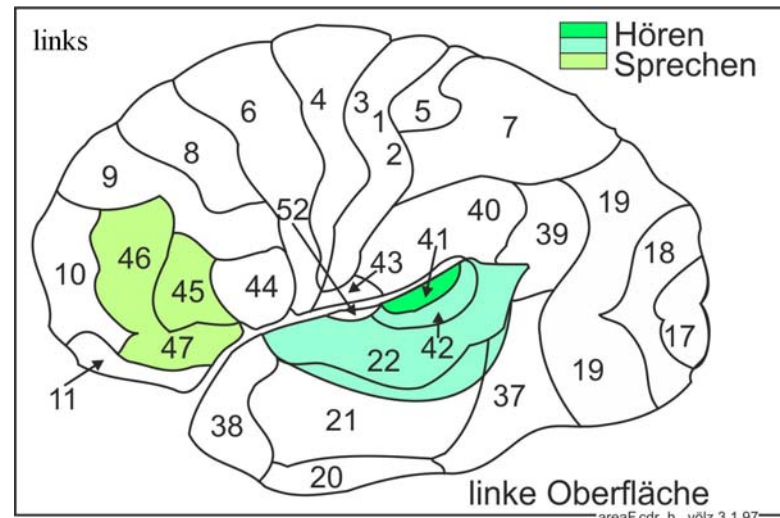
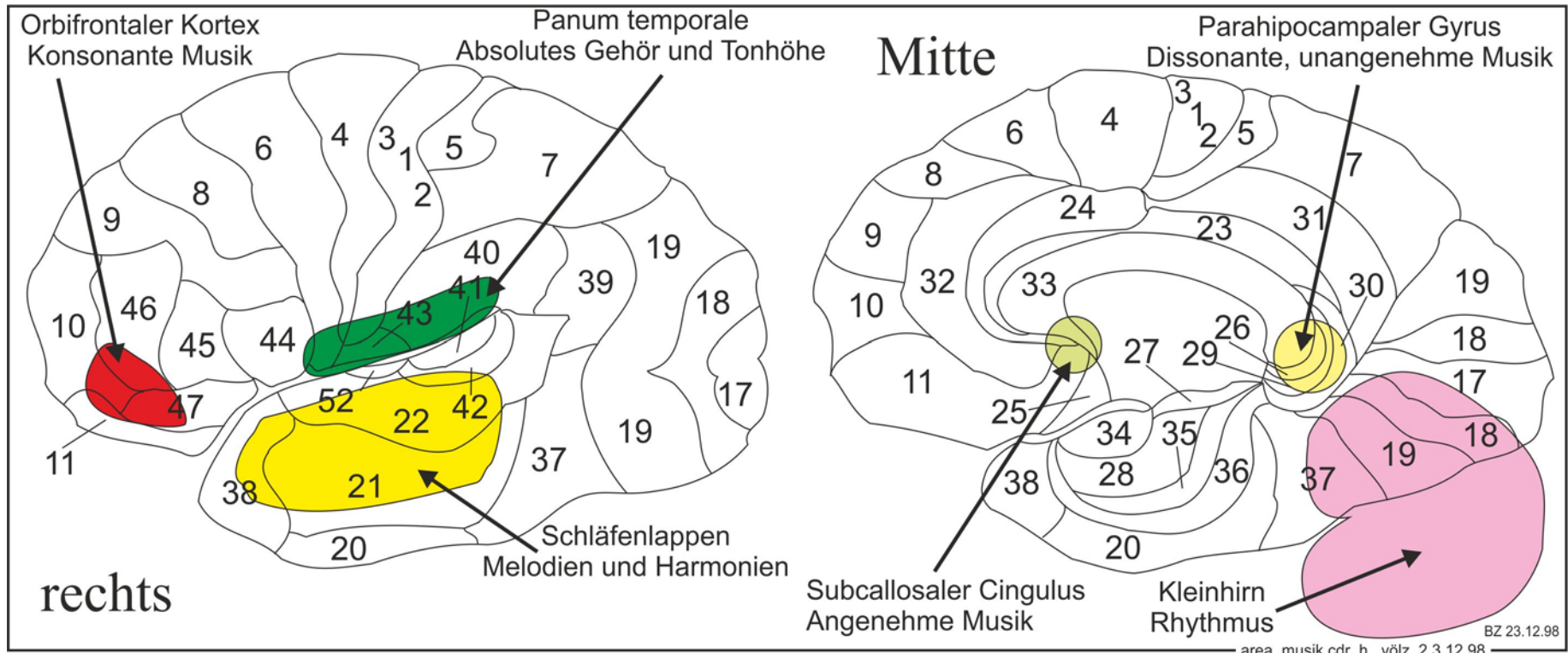
basilar.cdr h. vözl 25.10.96

Signalverarbeitung

Bereits in der Schnecke erfolgt durch die Besonderheit der Hydrodynamik eine komplexe Signalverarbeitung. Das wies 1956 Békésy (1899 - 1972) nach, indem er ein vergrößertes Modell auf den Unterarm legte. Bei umgerechneten Frequenzen ließ extrem genau ein Ort für jede Frequenz angeben. Genau wie beim Gehör genügen dabei deutlich weniger Schwingungszüge als theoretisch erforderlich wären. Doch auch die im Gehirn erfolgende Informationsverarbeitung ist höchst komplex. Das wird im Vergleich zum Sehen besonders deutlich. die vergleichsweise sehr wenigen Sinnzellen führen zu immer mehr komplexeren Hirnregionen. Schließlich sind etwa gleichviel Neuronen wie beim Sehen vorhanden.

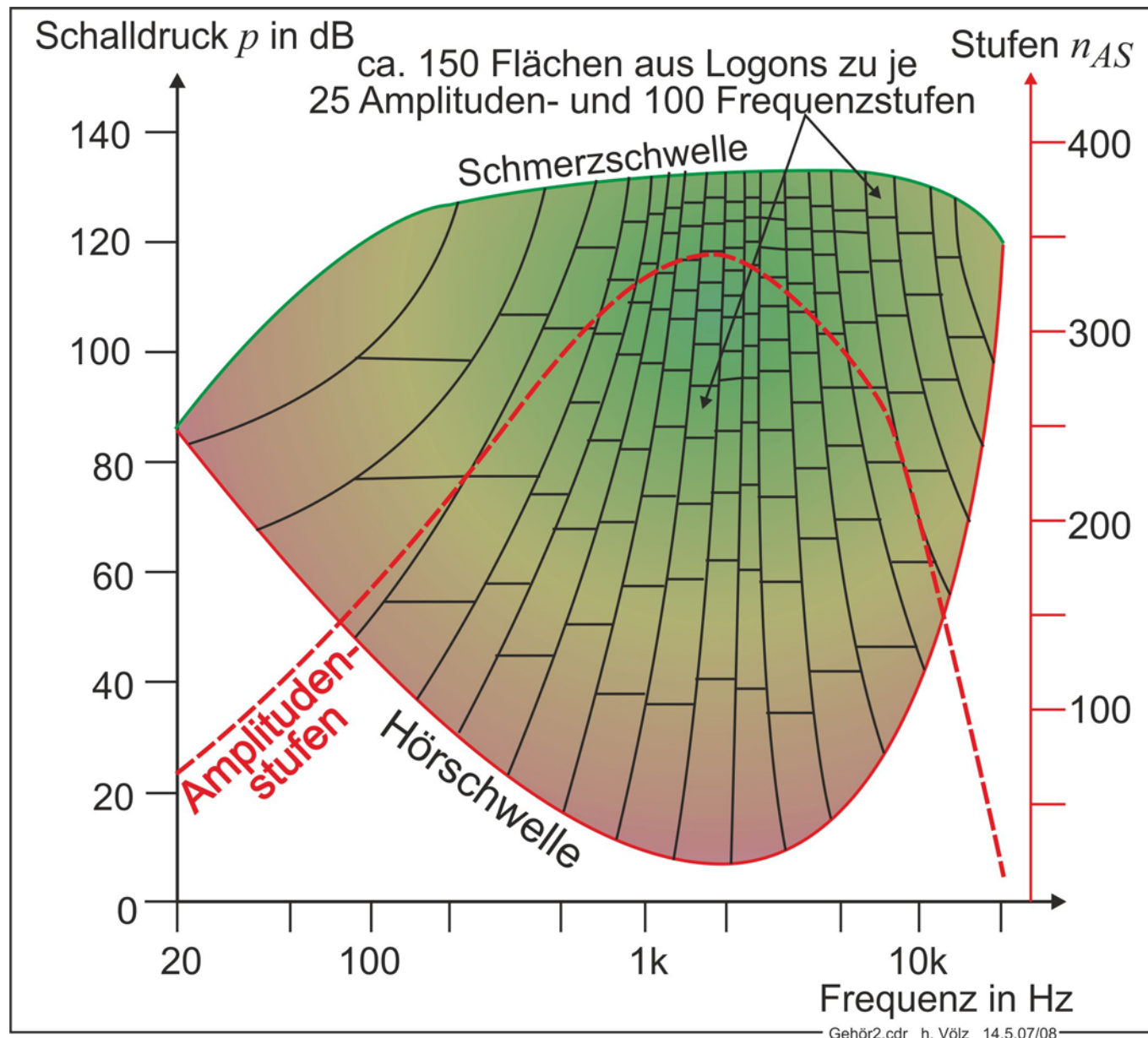


Erstaunlich ist, dass beim Gehör die rechte und linke Hirnhälfte auch deutlich spezielle genutzt werden. Dies zeigt das Bild der entsprechenden Areale insbesondere in Bezug auf Musik und z. T. auch Sprache.



Die Hörfläche

Sie ist durch die Hör- und Schmerzschwelle, sowie höchste und tiefste hörbare Frequenz begrenzt. Ähnlich wie beim Sehen lassen sich dann logons gewinnen. Sie ergeben sich aber deutlich einfacher. Denn beim „einfachen“ Schall kann sich nur die Lautstärke und die Frequenz einer einzelnen Sinusschwingung. Das steht im deutlichen Widerspruch zum Sehen, dafür können wir gleichzeitig viele Frequenzen hören. Beim Sehen gibt es nur die drei Komponenten der Zäpfchen (rot, grün, blau). Deutlich komplexer ist dafür die Verteilung der logons in der Hörfläche. Es gibt einen Bereich um 80dB und 1000 Hz, in dem wir besonders „genau“ hören können. Generell gibt es die meisten Amplitudensufen in der Umgebung von 1000 Hz. Dies steht im deutlichen Widerspruch zu Verteilung der Amplitudenstufen in der Technik (s. u.).



Verteilung der Amplitudenstufen

Im letzten Bild sind die unterscheidbaren Amplitudenstufen angedeutet.

Ihre Anzahl hängt erheblich von der Frequenz ab.

Grundsätzlich ist die Stufenverteilung unseres Gehörs etwa logarithmisch

Technisch nutzbar ist nur die maximale Stufenzahl bei etwa 1000 Hz.

Im Vergleich zu technischen Geräten gilt dabei das folgende Bild

Bei kontinuierlichen Kanälen ist sie gleichverteilt.

Deshalb besitzen sie bei größeren Lautstärken viel zu viele Amplitudenstufen und gleichzeitig zu wenig bei geringen Lautstärken.

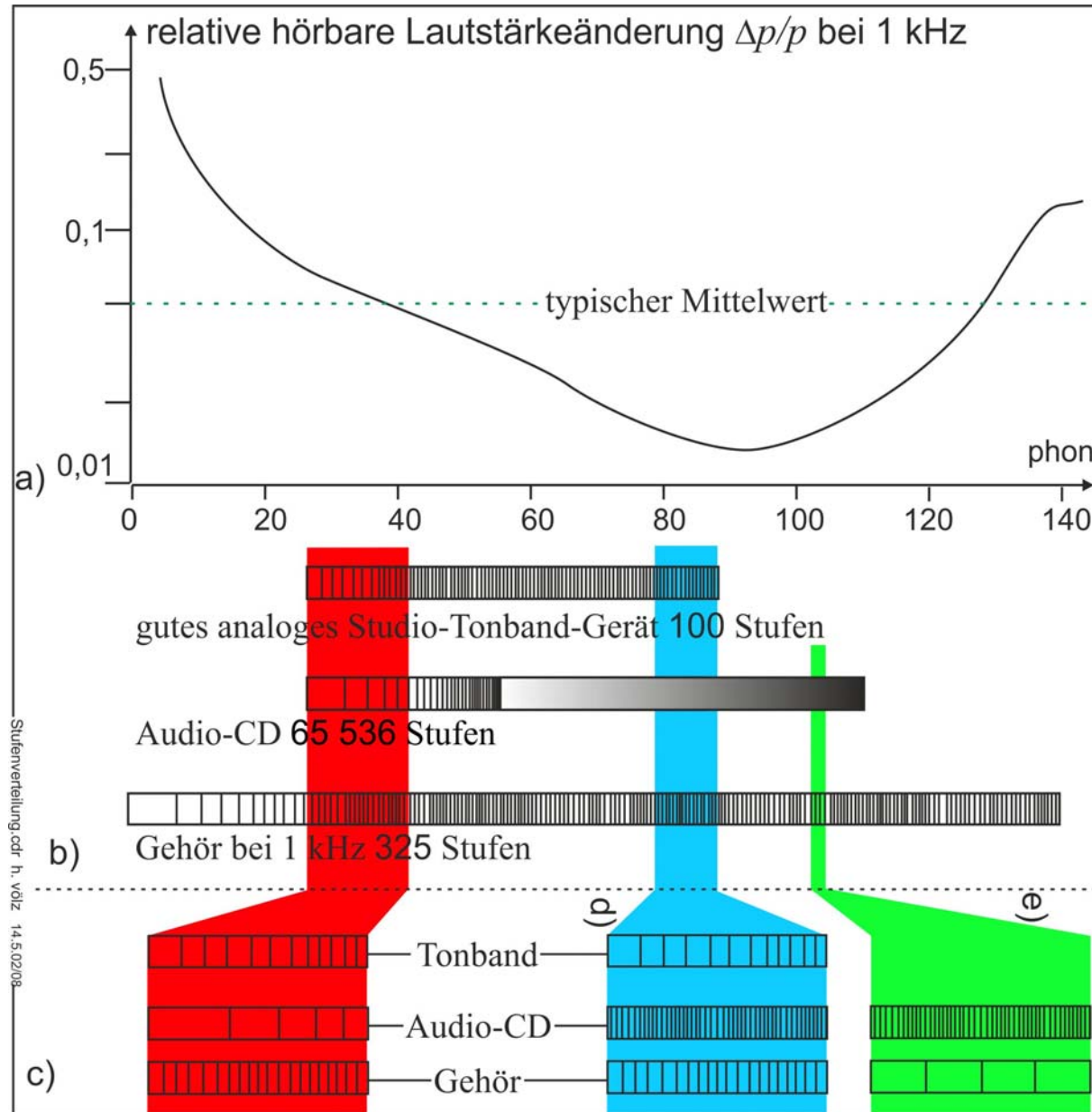
Beim Magnetbandgerät gibt es ebenfalls etwa logarithmisch verteilte Stufen.

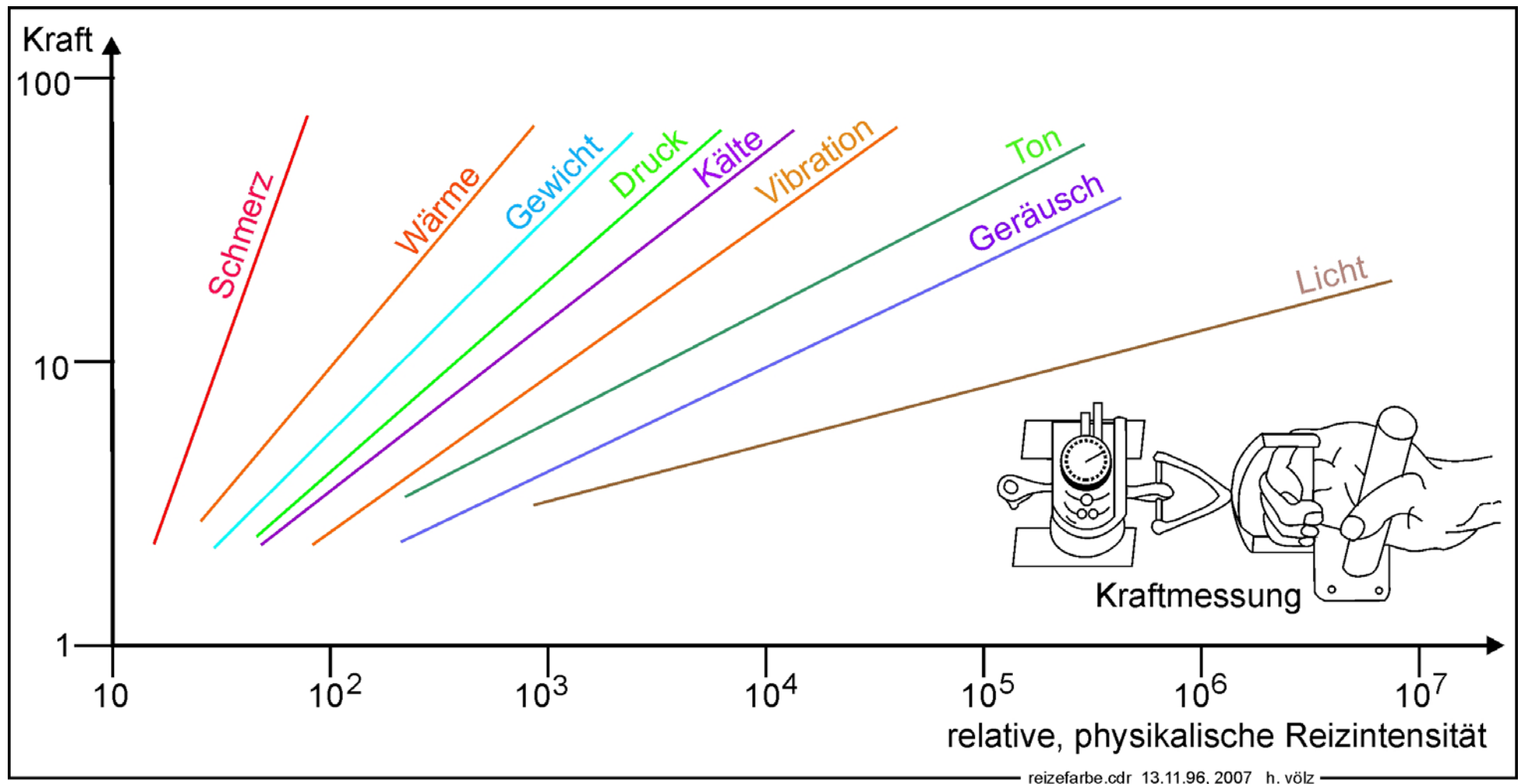
Sie beruhen darauf, dass das Rauschen bei Magnetbändern etwa proportional zum Pegel ist.

Das bedeutet multiplikatives Rauschen.

Trotz der relativ wenigen Stufen erreicht das Bandgerät eine sehr hohe subjektive Qualität.

Im Gegensatz zum Band ist die physiologische Ursache der logarithmischen Stufenverteilung das Gesetz von Weber-Fechner (übernächstes Bild)





Der physikalische Reiz ist die Ursache für die Wahrnehmung.
Sie wird subjektiv durch eine gleich stark empfundene Kraft festgestellt.
Auffällig ist, dass alle Reize nur logarithmisch bezüglich der physikalischen Wirkung empfunden werden.

Typischer Schall in der Hörfläche

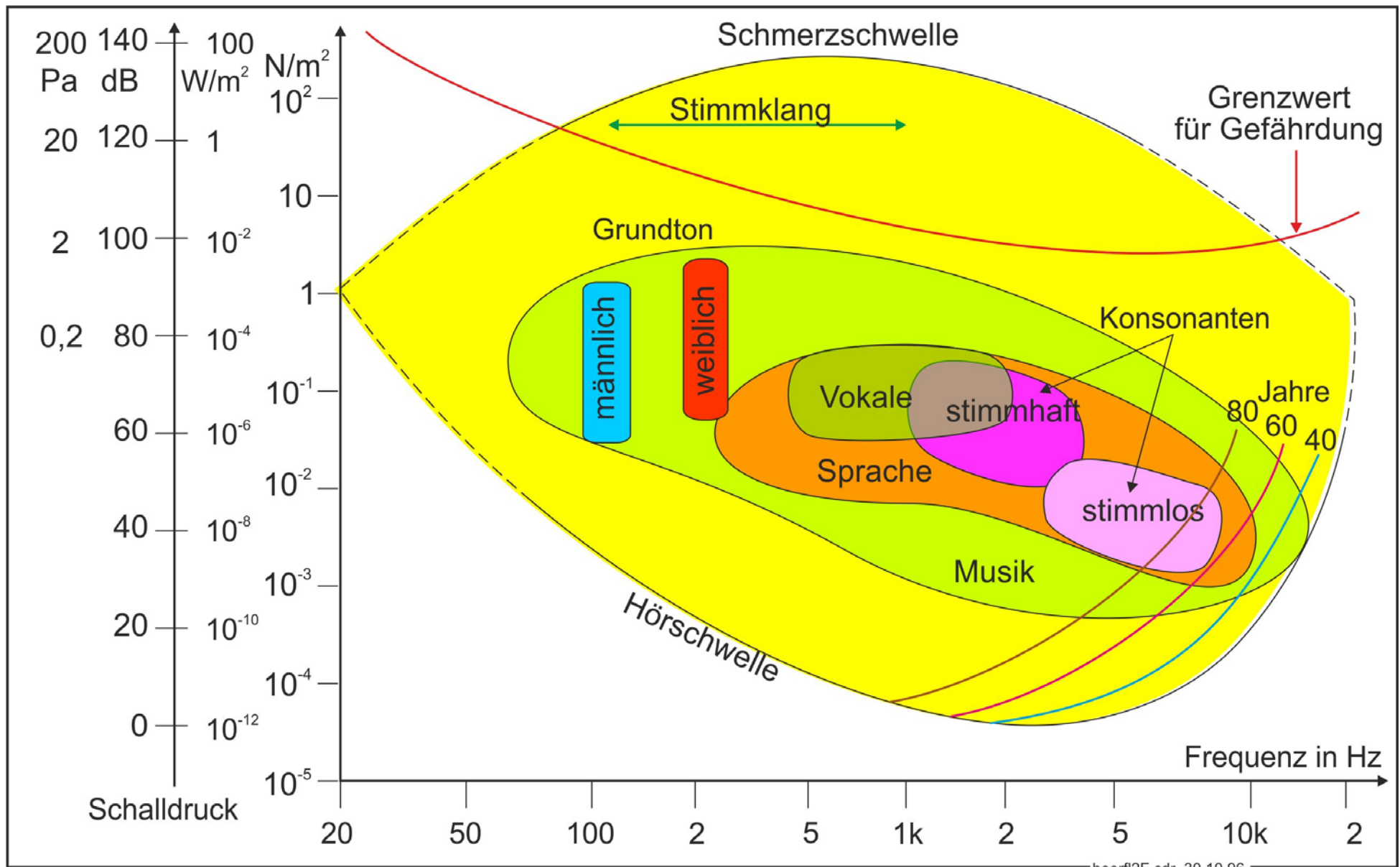
Die besonders ausgeprägten Schallsignale erzeugt der Mensch bei Sprache und Musik

Ihre entsprechenden Orte im hörbaren Bereich zeigt das nächste Bild.

Hier ist auch eingetragen ab welchen Pegeln der Schall mit großer Wahrscheinlichkeit schädigend wirkt.

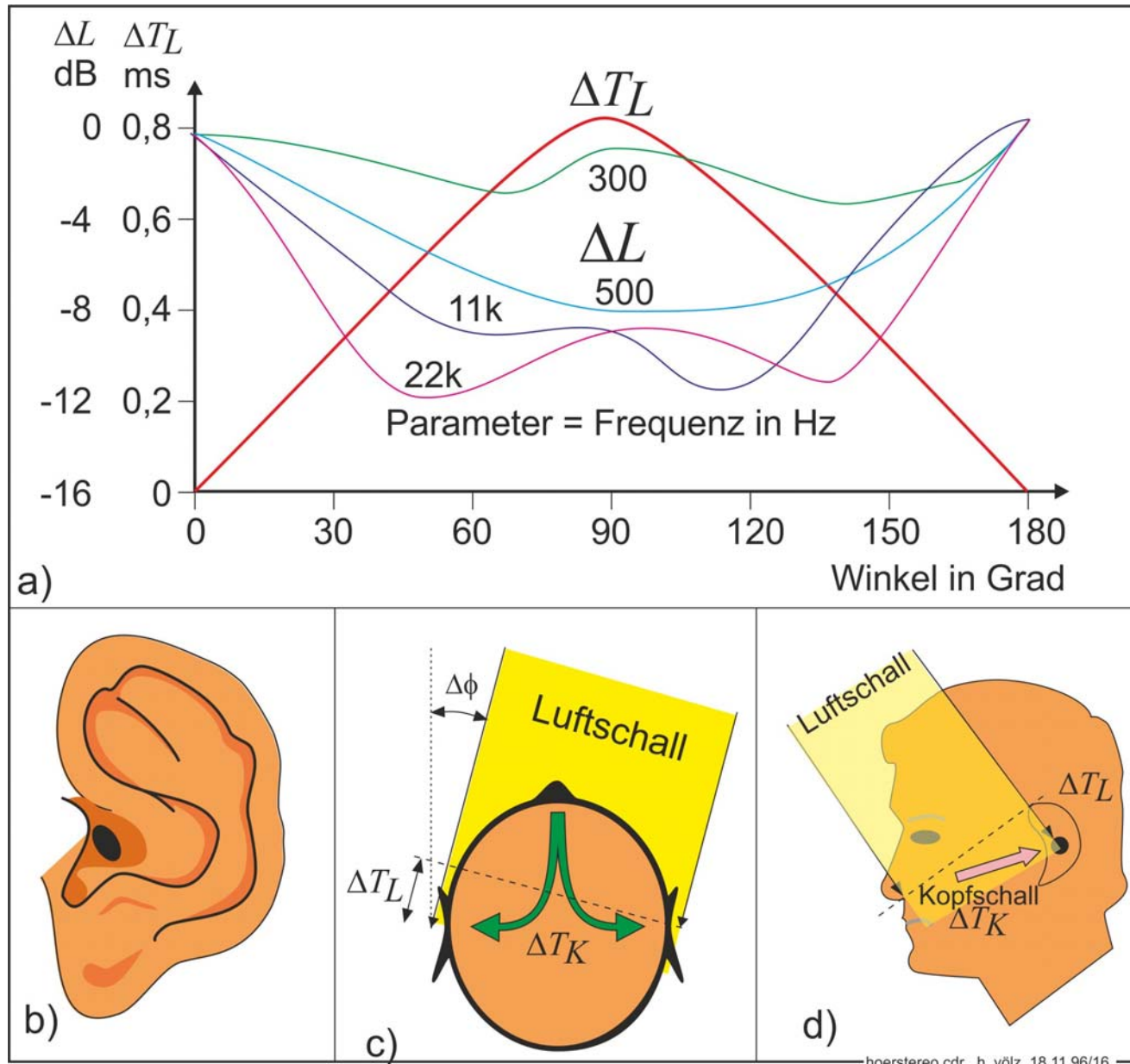
Schließlich sind noch die üblichen Grenzen eingetragen, die als Höhenverlust im Alter auftreten.

Bei der Sprache sind hierbei zunächst die stimmlosen Konsonanten betroffen.



Hören der Richtung

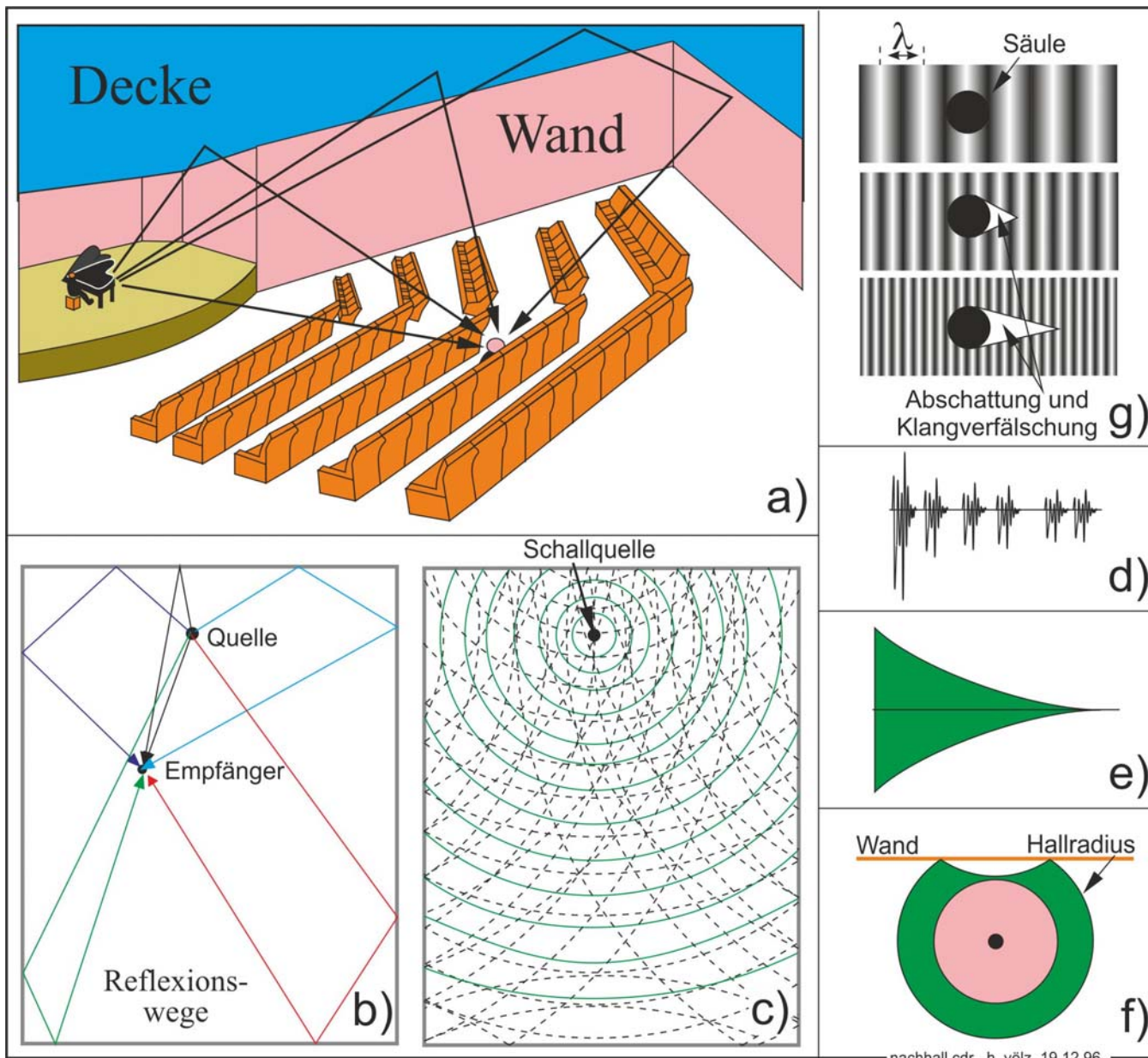
Wesentlich für das Richtungshören ist der Zeitunterschied des Schalles an beiden Ohren. Hierzu muss aber unter den Schallfrequenzen zumindest eine sein, deren Phaseunterschied das zulässt. Hierbei muss der eintretende Laufzeitunterschied in der Nähe des Ohrenabstandes sein. Bild c). Bei nur zu hohen und tiefen Frequenzen ist das nicht möglich. Zur Unterstützung dieses Faktos wirken die 2 bzw. 3 (vererbaren) Falten im Ohr mit (b). Aber auch dann bleibt noch ununterscheidbar, ob der Schall von vorne, unten oder oben kommt. So wurde im letzten Jahrzehnt festgestellt, dass hierfür die Nase wesentlich ist (c). der hier eintretende Schall wird als indirekter Knochenschall zum Ohr geleitet. Deshalb hören wir bei verstopfter Nase (Schnupfen) wesentlich schlechter die Unterschiede von vor, hinten usw.



Einfluss von Nachhall

Wir hören nicht nur die Richtung aus der der Schall kommt, sondern auch den Raum.
Hierfür sind Reflexionen an Wänden usw. entscheidend.
Im Gegensatz zum Licht wird der Schall jedoch vielfach reflektiert (Bild a und b).
Für Schall wirken nämlich fast alle „Wände“ wie verlustarme Spiegel.
So bleibt ein Schall durch die Vielfachreflexionen lange im Raum bestehen.
Es ergibt sich eine hoch komplexe Überlagerung der Wellenfronten (c)
Dies wird durch die Nachhallzeit angegeben, für die noch $\frac{1}{1000}$ des Primärschalls vorhanden ist (d, e).
Bezüglich der Erstreflexion gilt der Hallradius, der für den Mikrofoneinsatz (Charakteristik) wichtig ist.
Hinter Säulen usw. treten je nach Frequenz Schalllücken auf (g)

Auf der Basis der verschiedenen Schallreflexionen können sich Bilde im Raum orientieren.
Auch Fledermäuse, Wale usw. nutzen diese Effekte.
Letztlich wird auf dieser Grundlage die Qualität von Konzertsälen und Operhäusern bestimmt.

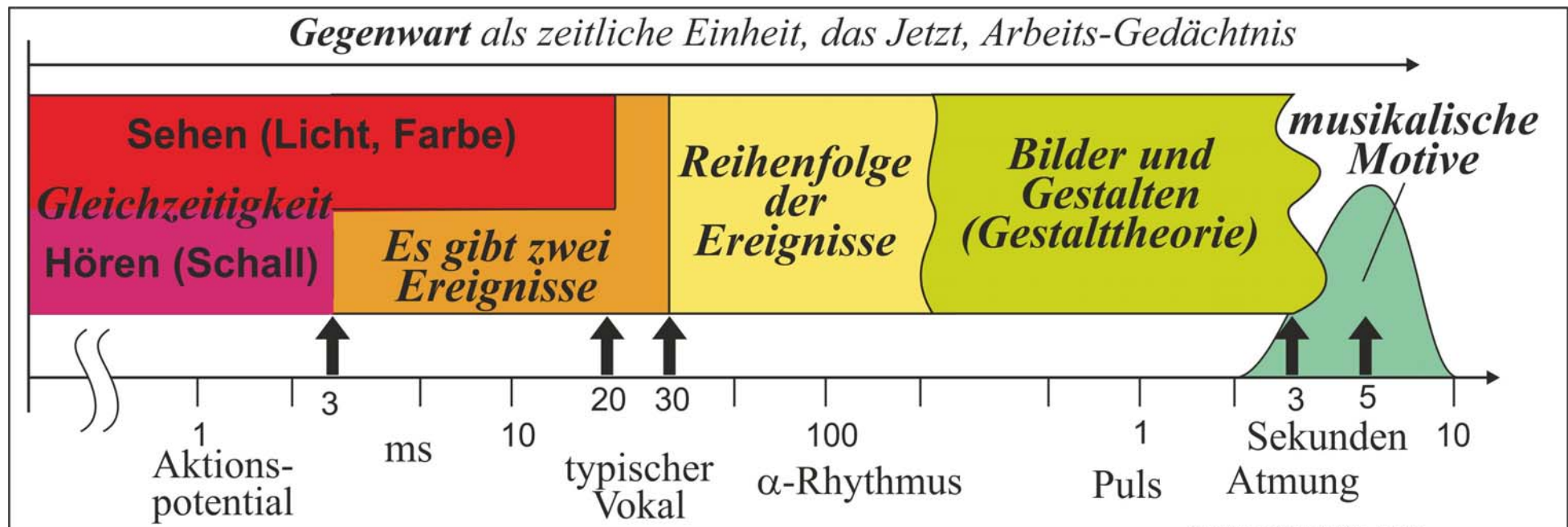


Zeitauflösung

Die Schallwahrnehmung ist deutlich schneller als die von Licht.

So genügen bereits 3 ms um zu entscheiden, ob 1 oder 2 Schalle aufgetreten sind. Bei Licht sind 20 ms nötig

Auch die Reihenfolge von Schallreizen können wir etwas schneller entscheiden.



Schalleigenschaften

Es gibt mehrere Schalleigenschaften, die wir mit unterschiedlicher Genauigkeit wahrnehmen können.

Wesentlich ist dabei wiederum die Frequenz und Lautstärke (folgendes Bild).

Hierzu gehören Schwankungen der Lautstärke in % oder als Modulationsgrad einer Sinusschwingung (a, b, c).

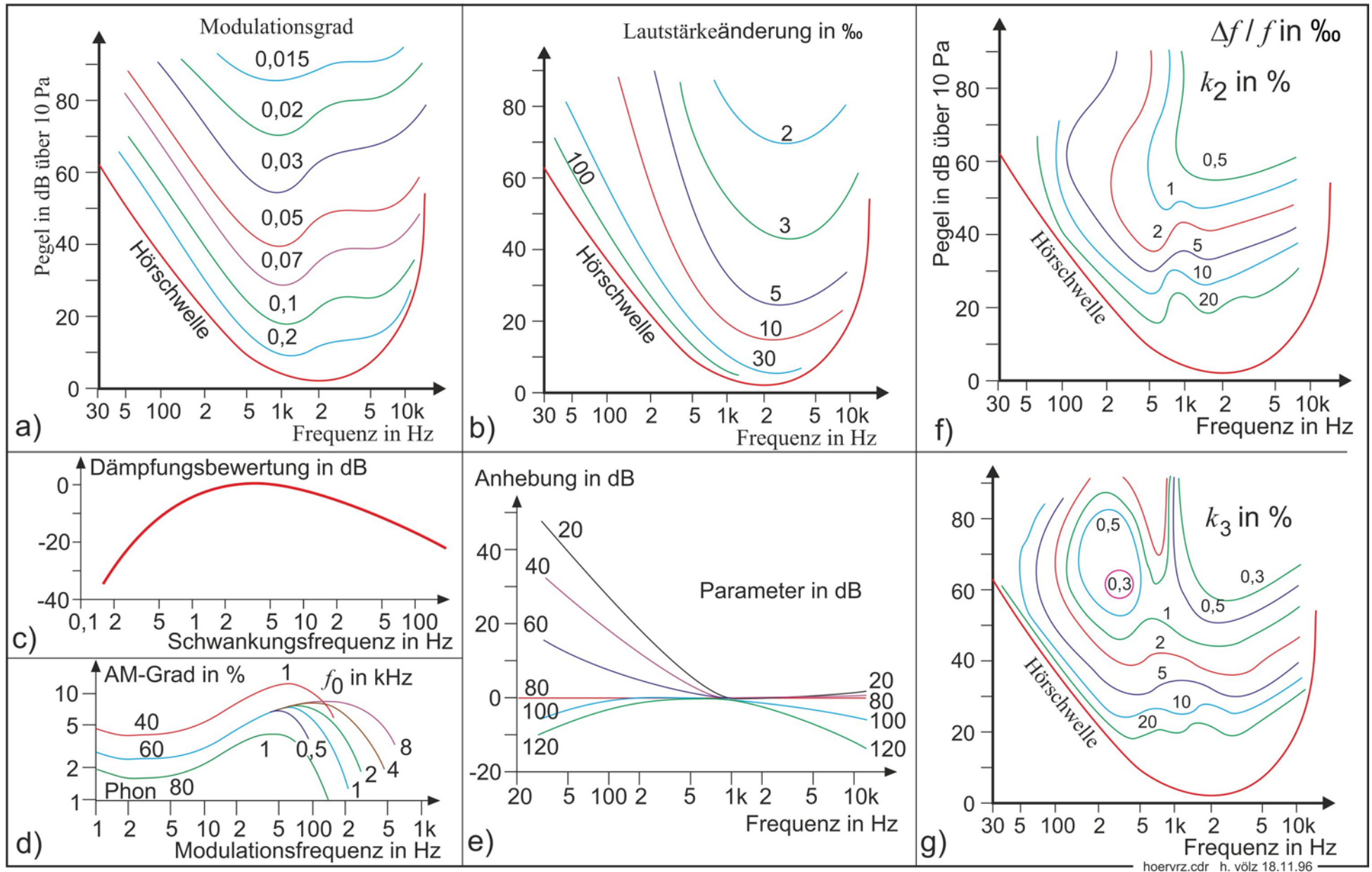
Auch für die Klirrfaktoren k_2 und k_3 existieren solche Kurven (f und g).

Für langsame Änderung der Frequenz ist unser Ohr besonders empfindlich (d).

Dieser Einfluss tritt besonders deutlich bei Klavierklängen auf.

Weniger beachtet wird, dass sich mit der Lautstärke auch die Bilanz zwischen hohen und tiefen Tönen ändert.

Früher gab es hierfür die gehörrichtige Lautstärkeregelung (e).



hoervrz.cdr h. vözl 18.11.96

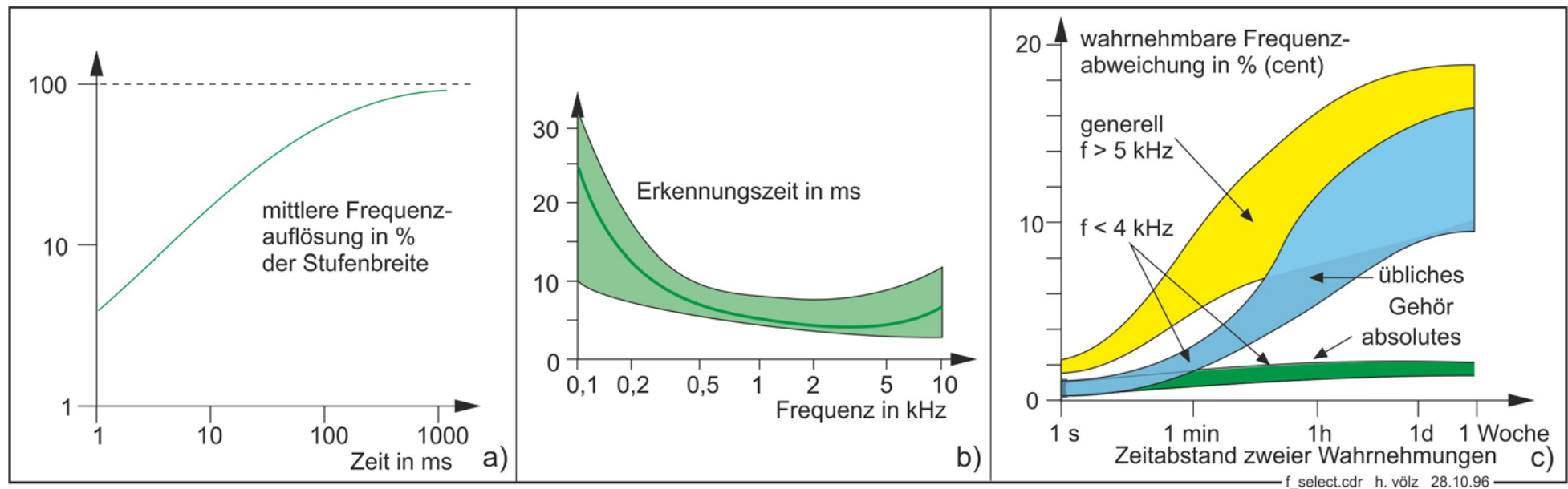
Absolutes Gehör

Einige Menschen besitzen ein absolute Gehör.

Sie können bei einem musikalischen Klang, die dazu gehörende Not exakt angeben

Das ist natürlich nur in dem Bereich möglich, in dem solche Notierungen existieren.

Oft wird angenommen, dass Kinder prinzipiell ein absolutes Gehör besitzen. Es geht mit der Sprache verloren.



Technischer Nutzen

Schalldateien möchten ohne Qualitätsverlust möglichst klein sein.

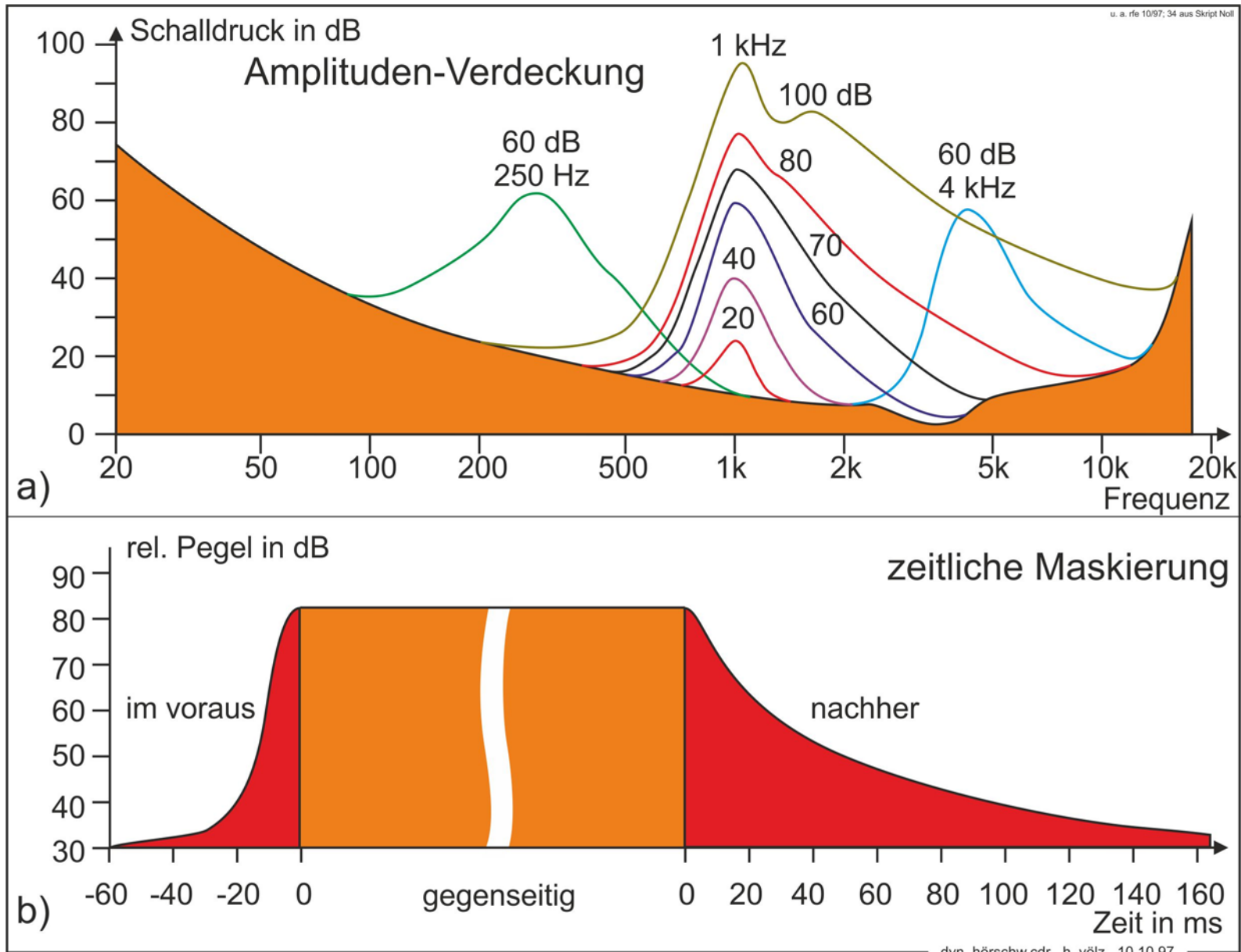
Hierzu werden nicht hörbare Irrelevanzen genutzt.

Schon beim frühen mpeg wurde dabei die Verdeckung leiste Frequenzen durch laute benutzt (nächstes Bild).

Dabei ist aber auch zu beachten, dass es zeitliche Vor- und Nachmaskierungen gibt (b).

Nutzber werden diese Effekte über eine Fouriertransformation.

MP3 nutzt darüber hinaus auch noch die begrenzte Anzahl und Verteilung der Amplitudenstufen aus (s.o.).



Vervollständigung der Grundlagen

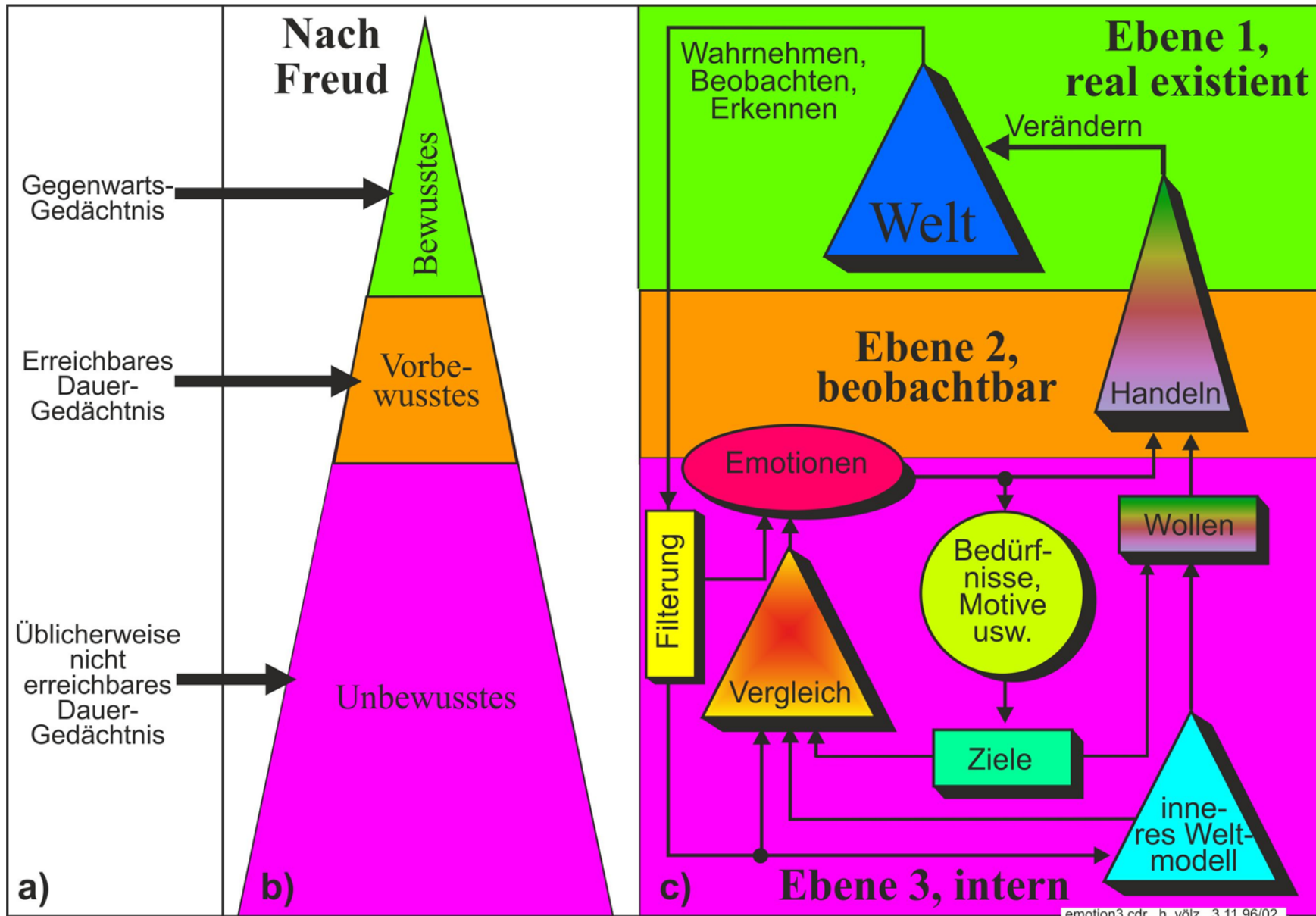
Für die allgemeine Nutzung von Sehen und Hören für andere Qualitäten sind zuweilen noch zwei weitere Gebiete notwendig.

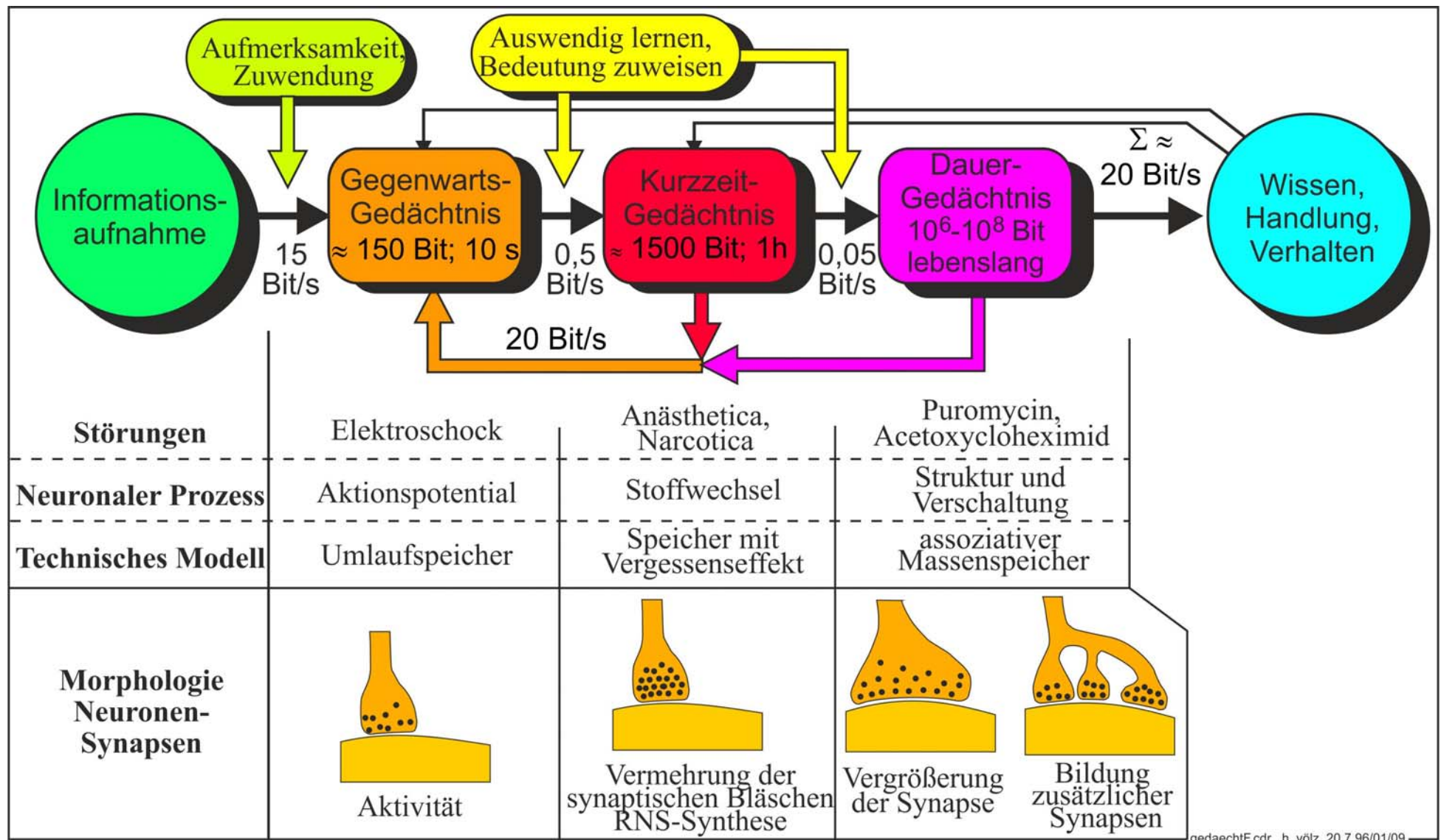
Sie werden im Folgenden nur ganz kurz erklärt, das sind unsere Emotionen und unser Gedächtnis.

Die Emotionen sind ein Widerspiegel für die Bedeutsamkeit des jeweiligen Ergebnisses.

Das Gedächtnis ist notwendig, um einen Vergleich mit unserer Erfahrung zu erreichen.

Details hierzu in Völz 2001 bzw.2003





Literaturauswahl

- Barnsley, M. F., Sloan, A. D.: A better Way to Compress images; Byte Jan. 1988, 215 - 222
- Fasold, W. u.a.: Taschenbuch Akustik. Verlag Technik. Berlin 1984
- Henn, H., Sinamبارi, G. R., Fallen, M.: Ingenieur-Akustik. 3. Auflage. Vieweg, Braunschweig - Wiesbaden, 2001
- Hoffmann, J.: Redundanz raus, Bildkompression mit DCT und anderen Transformationen. c't (1991), 6, 126 - 128
- Horn, E.: Vergleichende Sinnesphysiologie. G. Fischer - Verlag Jena 1982
- Köhn, C.: Bildanalyse und Bilddatenkompression Hanser-Verlag, München - Wien 1996
- Milde, T.: Videokompressionsverfahren. dpunkt, Heidelberg 1995
- Miller, F.: Die mp3-Story, Hanser. München 2015
- Reichardt, W.: Gute Akustik - aber wie. Verlag Technik Berlin, 1979
- Schmidt, R. F. u. Thews, G. (Hrsg.): Physiologie des Menschen, 25. Aufl. Springer Berlin u.a. 1993
- Schmidt, R. F.: Neuro - und Sinnesphysiologie. 2. Aufl. Springer Berlin u.a. 1995
- Skudrzyk, E.: Die Grundlagen der Akustik. Springer - Verlag Wien 1954
- Veit, I.: Technische Akustik. Vogel Buchverlag, Würzburg 1988
- Völz, H.: Das Mensch - Technik - System. Expert - Verlag, Renningen - Malsheim 1999 + Linde - Verlag
- Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Allgemeine Grundlagen für Naturwissenschaft, Technik und Medizin. Shaker Verlag, Aachen 2001
- Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 1 Grundlagen und Anwendung in Natur, Leben und Gesellschaft. Shaker Verlag Aachen 2003
- Zwicker, E.: Psychoakustik. Springer - Verlag. Berlin - Heidelberg - New York 1982