

# Physiologie II: Sinnesorgane

## Skript zur Vorlesung im Departement Umweltnaturwissenschaften

### **Educational Material**

**Author(s):**

Schierz, Christoph; Krueger, Helmut

**Publication date:**

2001

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004361784>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

# Physiologie II: Sinnesorgane

Skript zur Vorlesung im Departement Umweltnaturwissenschaften

**Ch. Schierz, H. Krueger**

**PU-01-03-LE**

***Zürich, den 25. Oktober 2001***

## 0.1. Inhalt

0.1. Inhalt .....	3
0.2. Literaturliste .....	4
1. Methoden und Prinzipien der Sinnesphysiologie .....	5
1.1. Umweltrealitäten, Probleme der Wahrnehmung .....	5
1.2. Betrachtungsebenen und Methoden.....	5
1.3. Grunddimensionen der Wahrnehmung.....	6
1.4. Objektive Sinnesphysiologie (Neurophysiologie).....	6
1.5. Subjektive Sinnesphysiologie (Wahrnehmung) .....	7
1.6. Bewertende Sinnesphysiologie (Empfindung) .....	9
1.7. Literatur.....	9
1.8. Allgemeine Fragen zur Sinnesphysiologie.....	9
2. Thermorezeption .....	11
2.1. Thermorezeption der Haut.....	11
2.2. Statische Temperaturwahrnehmung.....	12
2.3. Dynamische Temperaturwahrnehmung.....	13
2.4. Rezeptoren .....	14
2.5. Thermophysiologie.....	15
2.6. Globaler thermischer Komfort .....	19
2.7. Lokaler thermischer Komfort.....	23
2.8. Adaptive Komfortmodelle.....	24
2.9. Literatur.....	25
2.10. Fragen zur Thermorezeption .....	26
3. Sensomotorik .....	28
3.1. Überblick und Grundbegriffe .....	28
3.2. „Messfühler“ .....	29
3.3. Psychometrie .....	30
3.4. Cortex-ZNS (funktionelle Anatomie) .....	30
3.5. Organisation von Bewegungen.....	31
3.6. Methodik .....	32
3.7. Literatur.....	33
3.8. Fragen zur Sensomotorik.....	33
4. Schmerz .....	35
4.1. Schmerzerfahrungen .....	35
4.2. Schmerzcharakterisierung .....	36
4.3. Schmerztheorie.....	36
4.4. Schmerztherapie.....	36
4.5. Schmerzmessung .....	37
4.6. Literatur.....	37
4.7. Fragen zum Schmerz.....	37
5. Geruch und Geschmack .....	38
5.1. Einleitung .....	38
5.2. Geruch: Rezeptormodelle .....	38
5.3. Geruch: Neurophysiologie .....	39
5.4. Geschmack: Rezeptormodelle.....	41
5.5. Geschmack: Neurophysiologie .....	41
5.6. Literatur.....	42
5.7. Fragen zu Geruch und Geschmack.....	42
6. Hören .....	43
6.1. Physikalische Grundlagen .....	43
6.2. Anatomische Grundlagen .....	44
6.3. Biomechanik der Basilarmembran des Innenohrs .....	45
6.4. Physiologie.....	46
6.5. Psychophysik (energetische Betrachtung).....	47
6.6. Psychophysik (Wahrnehmung) .....	48

6.7. Ton-Audiometrie .....	50
6.8. Frequenzauflösung .....	51
6.9. Richtungshören.....	51
6.10. Literatur.....	52
6.11. Fragen zum Hören .....	52
7. Gleichgewicht und Psychotoxikologie .....	53
7.1. Nervöse Kontrolle von Haltung und Bewegung im Überblick .....	53
7.2. Gleichgewichtssinn .....	54
7.3. Funktion des Kleinhirns.....	55
7.4. Psychotoxikologie .....	57
7.5. Literatur.....	58
8. Sehen.....	59
8.1. Aufbau und Funktion des Auges.....	59
8.2. Helligkeit und Kontrast .....	61
8.3. Farbsehen.....	65
8.4. Bewegungssehen, Flimmerempfindlichkeit.....	66
8.5. Raum- bzw. Tiefensehen .....	69
8.6. Literatur.....	69
8.7. Fragen zum Sehen .....	70
9. Kognition .....	72
9.1. Organisation des Cortex und "Begleitreaktionen" .....	72
9.2. Modelle der Muster- und Objekterkennung.....	73
9.3. Wahrnehmungsprozesse .....	74
9.4. „Look-Up“-Wahrnehmung .....	75
9.5. Gedächtnis.....	77
9.6. Emotionale Bewertung.....	80
9.7. Literatur.....	81
9.8. Fragen zur Kognition.....	81

---

## 0.2. Literaturliste

---

- Anderson J.R.: Kognitive Psychologie. Eine Einführung. 2. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1996), ≈ sFr 65.–
- Lindsay P.H., Norman D.A.: Human Information Processing: An Introduction to psychology. 2nd Ed. Harcourt Brace & Co. (1977) ≈ sFr 85.– (0-15-540377-X).
- Schmidt R.F., Thews G.: Physiologie des Menschen. 26. Aufl. Springer, Berlin (1995), ≈ sFr 135.–
- Schmidt R.F.: Neuro- und Sinnesphysiologie. 2. Aufl. Springer, Berlin (Springer-Lehrbuch) (1995), ≈ sFr 34.–
- Deetjen P., Speckmann E.-J.: Physiologie (mit Lerndiskette). 2. Aufl. Urban & Schwarzenberg, München (1994), ≈ sFr 89.–
- Silbernagl S., Despopoulos A.: Taschenatlas der Physiologie. 4. Aufl. Thieme, Stuttgart (1991), ≈ sFr 37.–
- von Campenhausen Ch.: Die Sinne des Menschen. 2. Aufl. Thieme, Stuttgart (1993), ≈ sFr 84.–
- Churchland P.S., Sejnowski T.J.: The Computational Brain. MIT-Press (1992) ≈ sFr 90.–

# 1. Methoden und Prinzipien der Sinnesphysiologie

Ziel: Verknüpfung von objektiver Realität und subjektiver Wahrnehmung.

Demonstration von Grundphänomenen aus dem Bereich des Sehens (können im Kapitel über „Sehen“ wiederholt werden, hier nur Phänomenologie).



In dieser Vorlesung werden die Begriffe Wahrnehmung und Empfindung so verwendet, wie in der Umgangssprache üblich: Man kann beispielsweise *wahrnehmen*, wo ein Schmerz entsteht und ihn zusätzlich als unangenehm *empfinden*. Im Sprachgebrauch der Psychophysiologie der Sinnesorgane werden die Begriffe umgekehrt verwendet.

## 1.1. Umweltrealitäten, Probleme der Wahrnehmung

Korrelationen die durch Beobachtungen gestützt werden, führen zu einer Kette von Wahrnehmung der „Umweltrealitäten“:

Phänomene der Umwelt

- ↪ Sinnesreize (Interaktion mit Sinnesorganen)
  - ↪ Erregung sensorischer Nervenzellen
    - ↪ Integration im ZNS (Gehirnzentren, EEG, evozierte Potentiale)
      - ↪ Sinneseindrücke (Bewusstsein)
        - ↪ Wahrnehmung (Erfahrung, Erkennen einer Realität)
          - ↪ Empfindung (Affekt, Attribuierung)

Grundsätzlich zu lösende Probleme sind folgende:

Menge der Daten	→ Prinzipien der Datenreduktion
mangelhafte Übertragungsqualität	→ Prinzipien der Signalverbesserung
Stabilität der inneren „Welt“ trotz veränderlicher äusserer „Welt“	→ Prinzipien der Wahrnehmungskonstanz (z.B. Verarbeitung der Relativbewegung)
Informationsidentifikation	→ „Perceptron“
Adäquater Reiz	→ falsch- und unspezifische Reizwahrnehmung
Kausalität (z.B. Pulfrich-Pendel, vgl. „Sehen“)	→ differierende Reizübertragungsgeschwindigkeiten

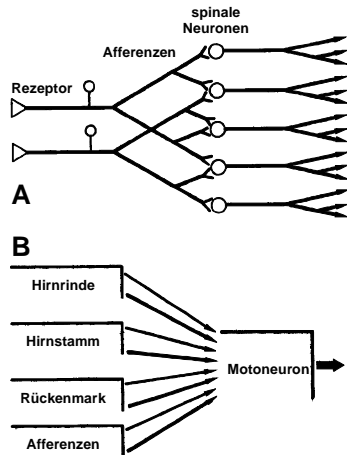
## 1.2. Betrachtungsebenen und Methoden

Wissensbereich	Vorgehensweise	Methoden
Neurophysiologie	Experiment – Regel/Gesetz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Histologie</li> <li>• extra- und intrazelluläre Ableitung</li> <li>• EOG, EMG, EKG, Elektroencephalogramm (EEG) etc.</li> <li>• evozierte Potentiale</li> <li>• Positronenemissionstomographie (PET)</li> <li>• magnetische Dipoldarstellung (Squids)</li> </ul>
experimentelle Psychologie	Experiment – Modell	<ul style="list-style-type: none"> <li>• psychophysikalische "Reiz-Reaktion" Experimente</li> </ul>
Psychophysiologie	Experiment – Modell	<ul style="list-style-type: none"> <li>• operationale Messungen vegetativer Parameter (Blutdruck, Puls, Muskelpotentiale, Psychogalvanischer Hautreflex, Pupillenreaktion etc.)</li> </ul>
Psychologie	Beobachtung – Modellverifikation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fragebogen</li> <li>• Intervention</li> </ul>
Soziologie	Beobachtung – Modell	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fragebogen</li> <li>• Intervention</li> </ul>

### 1.3. Grunddimensionen der Wahrnehmung

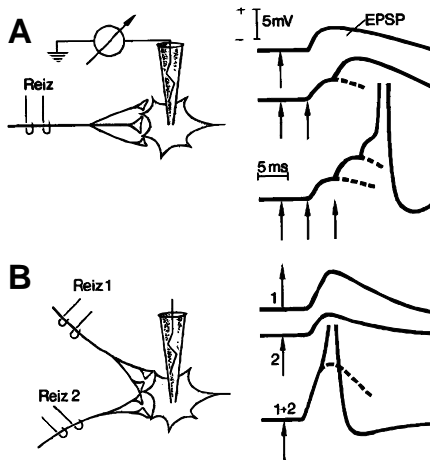
- **Modalität:** Sinnesorgan bzw. Sinn mit spezifischer Wahrnehmung
- **Qualität:** verschiedene Wahrnehmungsqualitäten innerhalb eines Sinnes
- **Intensität:** Quantität der Wahrnehmung einer Modalität
- **Raum**
- **Zeit**

### 1.4. Objektive Sinnesphysiologie (Neurophysiologie)



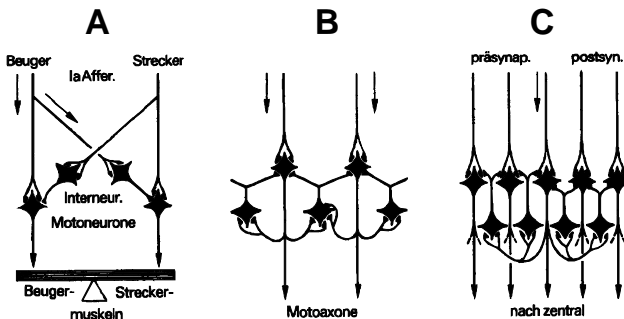
**Divergenz und Konvergenz:**

(A) Schematische Darstellung der Divergenz zweier Hinterwurzelfasern (Afferenzen) auf spinale Neurone. Die Axone dieser Neurone zweigen sich wiederum in zahlreiche Collaterale auf. (B) Schematische Darstellung der auf ein Motoneuron konvergierenden erregenden und hemmenden Zuflüsse. Das Motoneuron bildet die „gemeinsame Endstrecke“.



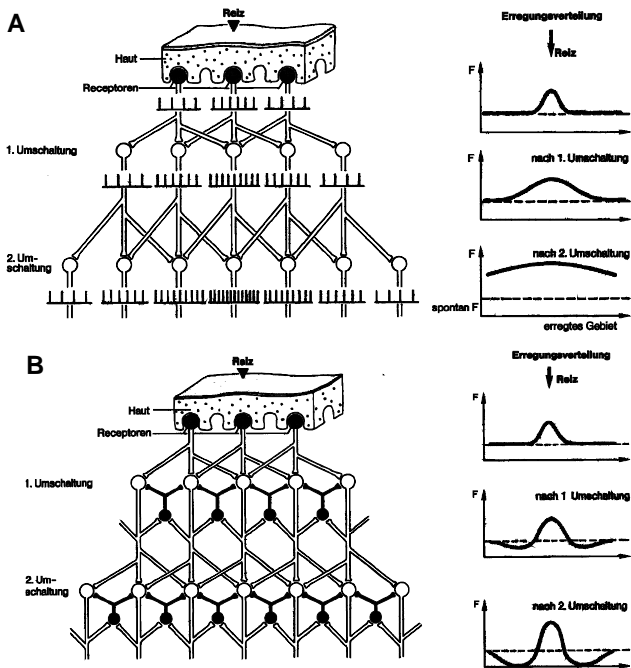
**Bahnung (Summation) im Nervensystem:**

(A) Zeitliche Bahnung: Einzelreiz (ein Pfeil) und Doppelreiz (zwei Pfeile, Reizabstand etwa 4 ms) erzeugen ein unterschwelliges EPSP, der dritte Reiz (drei Pfeile) löst ein Aktionspotential aus. (B) Räumliche Bahnung: Reiz 1 und Reiz 2 lösen je ein unterschwelliges EPSP aus. Gleichzeitige Reizung beider Axone führt zu einem Aktionspotential.



**Einfache hemmende Schaltkreise:**

- (A) Antagonistische Hemmung
- (B) Negative Rückkopplung (Feedback-Hemmung), hier Bsp. Renshaw-Hemmung
- (C) Laterale Hemmung



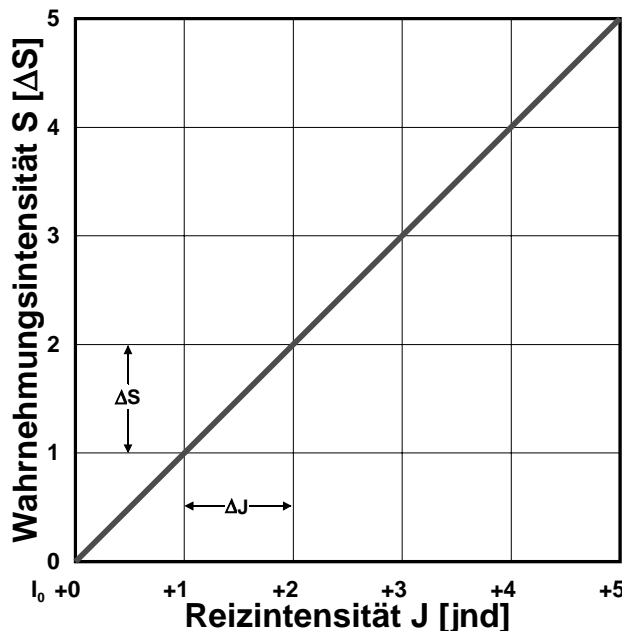
**Effekt der lateralen Hemmung:**

(A) Links: Schema der erregenden synaptischen Verbindungen von 3 Rezeptoren und 2 darauf folgenden synaptischen Ebenen. Die senkrechten Striche auf den Verbindungsleitungen deuten die entsprechenden Erregungsfrequenzen während des Reizes an. Rechts: Verteilung der Entladungsfrequenzen  $F$  im „erregten Gebiet“ um den Reizort auf der Ebene der Rezeptoren und den synaptischen Ebenen.

(B) Wirkung zusätzlich hemmender Interneuronen. In den Entladungsverteilungen rechts wird lateral vom Reizort die Ruhefrequenz (gestrichelt) unterschritten, diese laterale Hemmung ist als durchgezogene Linie eingetragen (siehe auch „Funktionelle Organisation rezeptiver Felder der Ganglienzellen“ im Kapitel „Sehen“).

**1.5. Subjektive Sinnesphysiologie (Wahrnehmung)**

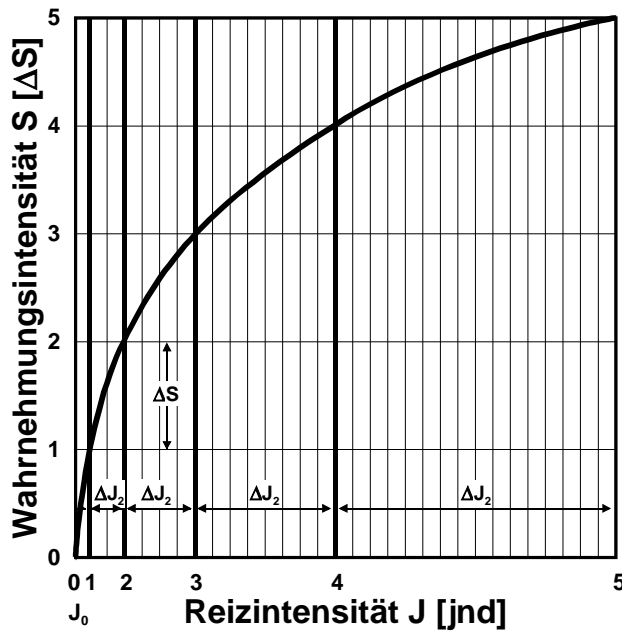
Psychometrie: In der traditionellen Psychophysik wurden vor allem Schwellen der Wahrnehmung bestimmt, der Mensch sozusagen als „Null“-Instrument eingesetzt. Der Mensch wird auf eine ja-nein Antwort reduziert. Aus den Schwellen wurden Sensitivitätsskalen (Intensitätsskalen) abgeleitet. Erst in der Mitte dieses Jahrhunderts kamen absolute Intensitätsschätzungen hinzu. Im folgenden werden die verschiedenen Modelle der Sensitivität aufgelistet. Gleichzeitig wird auf ihre Bedeutung für die Messtechnik hingewiesen. Ausgangspunkt ist ein Beispiel für die Intensitätskodierung in einem sensorischen System.



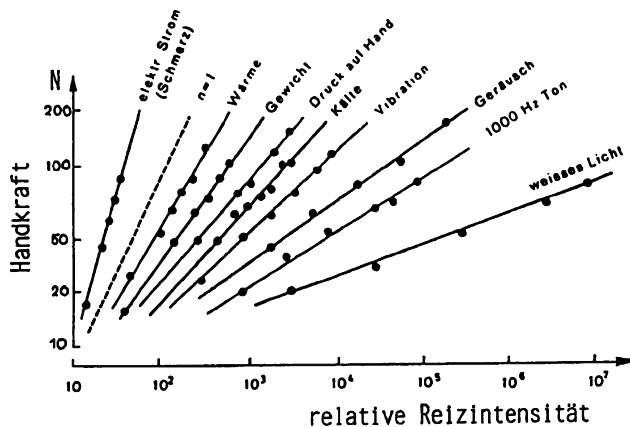
$$S = k \cdot (J - J_0).$$

Lineares Modell: Die messtechnisch einfachste Annahme für ein Modell, ist diejenige eines von der absoluten Reizstärke unabhängigen gerade merkbaren Reizintensitätsunterschieds  $\Delta J = \text{const.}$  (jnd = „just noticeable difference“). Wenn man in einfachster Annahme ferner voraussetzt, dass  $\Delta J$  einer elementaren Wahrnehmungsstufe  $\Delta S$  proportional ist, gelangt man nach Integration von  $\Delta S = k \cdot \Delta J$  zu einem linearen Modell (siehe Gleichung). Dabei ist  $J_0$  die absolute Reizschwelle. Sie beträgt z.B. für weisses Licht  $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ cd/m}^2$ . Dem Helligkeitsmass „Leuchtdichte“ ( $\text{cd/m}^2$ ) liegt ein lineares psychophysisches Modell zugrunde, obwohl die Helligkeitswahrnehmung nicht linear verläuft.





$$S = k \cdot \int_{J_0}^J \frac{dJ}{J} = k \cdot \ln\left(\frac{J}{J_0}\right)$$



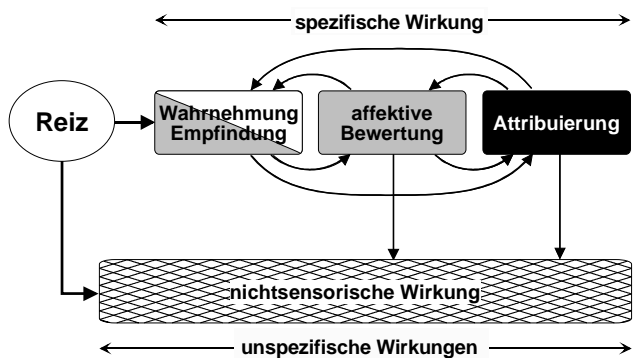
$$\log S = n \log J + \log k; S = k (J - J_0)^n$$

Reizqualität	Reizbereich	Exponent n
Temperatur (warm)	2,0 – 14,5 °C (> T <sub>indiff</sub> )	1,6
Temperatur (kalt)	3,3 – 30,6 °C (< T <sub>indiff</sub> )	1,0
Gewicht	0,28 – 4,80 N	1,45
Länge	einige cm	1,0
Druck (Hand)	2,5 – 25,0 N	1,1
Lautheit (Rauschen)	55 – 95 dB	0,6
Lautheit (1 kHz)	47 – 87 dB	0,6
Helligkeit (weiss)	56 – 96 dB	0,33

**Logarithmisches Modell:** E.H.L. Weber untersuchte die Abhängigkeit des kleinsten wirksamen Reizunterschieds  $\Delta J$  in Abhängigkeit von der absoluten Reizgrösse  $J$  und entdeckte die nach ihm benannte Beziehung  $\Delta J / J = \text{const.}$ , die in einem mittleren Intensitätsbereich gültig ist. Die Erfahrung, dass bei vielen Wahrnehmungen die Intensität bei steigendem Reiz nicht beliebig weiterwächst, sondern einem maximalen Sättigungspunkt zustrebt, führte G.T.Fechner zur Vermutung, dass die Wahrnehmungsintensität  $S$  zum Logarithmus der Reizgrösse  $J$  proportional ist:  $S = k \log J + \text{const.}$  Unterstellt man, dass die Webersche Beziehung nicht nur für die Unterschiedsschwelle, sondern generell anwendbar ist, so kann man durch Integration diese Gleichung in die **Weber-Fechnersche Regel** überführen (siehe Gleichung). Dabei ist  $J_0$  die absolute Reizschwelle. (Siehe auch „Abhängigkeit der Aktivierung einer retinalen Ganglienzelle von der Reizstärke im Kapitel „Sehen“). Den Lautstärkemassen „phon“ und „dB(A)“, der Schwingstärke „K-Wert“ bei Vibrationen sowie dem Geruchsstärkemass „dB<sub>G</sub>“ liegen logarithmische psychophysische Modelle zugrunde.

**Exponentielles Modell:** S.S. Stevens hat Probanden die tatsächliche Sensitivität einstellen lassen, um die Hypothese von Fechner zu überprüfen. Das Ergebnis war eine Gerade in einem doppelt logarithmischen Koordinatensystem. Die Wahrnehmungsintensität wurde mit den in der Abbildung dargestellten Ergebnissen mit der Methode des intermodalen Intensitätsvergleiches ermittelt. Bei dieser Methode werden die Reize nicht mit Zahlen skaliert, sondern mit der eingestellten Intensität in einer anderen Sinnesmodalität verglichen. Hier ist es die Handkraft, die über interne Kraftsensoren vermittelt wird. Es ergeben sich die **Potenzfunktionen von Stevens** (siehe Gleichungen), wobei  $J_0$  die absolute Reizschwelle darstellt. Dem Lautheitsmass „sone“ liegt ein exponentielles psychophysisches Modell zugrunde.

## 1.6. Bewertende Sinnesphysiologie (Empfindung)



Verknüpfung verschiedener sensorischer Wirkungsebenen: Die Komponenten der spezifischen und der unspezifischen Wahrnehmung beeinflussen sich gegenseitig. Alle Komponenten können einzeln oder gemeinsam indirekte Wirkungen verursachen, z.B. vegetative Störungen. Lärm kann beispielsweise Fingerpuls und Blutdruck verändern.

Spezifische Wahrnehmung → Wahrnehmung.  
 unspezifische Wahrnehmung → „Empfindung“,  
affektive Bewertung, Attribuierung.

## 1.7. Literatur

- Schmidt & Thews: Physiologie des Menschen: Kap. 8: Allgemeine Sinnesphysiologie und Kap. 7: Das Nervensystem - nachrichtentechnisch gesehen.
- Schmidt R.F.: Neuro- und Sinnesphysiologie; Kap. 7.
- Lindsay, P.H., Norman D.A.: Human Information Processing; App. A + B.

## 1.8. Allgemeine Fragen zur Sinnesphysiologie

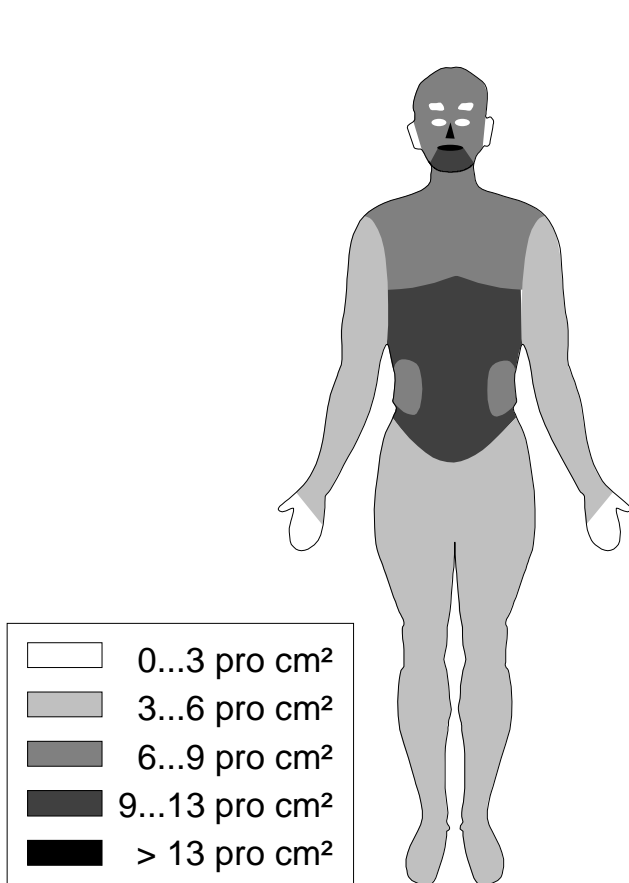
- 1-1 Erklären Sie am Beispiel der Organisation der Körpermotorik (Sensoren, Stellglieder, Sollwerte) das Prinzip eines Regelkreises.
- 1-2 Nennen Sie Beispiele physiologischer Regelkreise (Regelsysteme).
- 1-3 Wie können Sie nachweisen, dass Elemente einer Merkmalsklasse (Kodierungsdimension) seriell und Elemente verschiedener Merkmalsklassen parallel perzipiert werden können?
- 1-4 Welche Prinzipien der Informationsreduktion werden bei der Abbildung der "objektiven Welt" in die "interne Welt" eingesetzt? Geben Sie Beispiele.
- 1-5 Welche Beobachtung liegt der Weber-Fechnerschen Regel zu Grunde? Wie leiten Sie dieses ab? Erklären Sie die Vorgehensweise an einem Beispiel.
- 1-6 Der Exponent  $n$  der Potenzfunktion nach Stevens für eine Wahrnehmung  $S = k (J - J_0)^n$  hat bei verschiedenen Wahrnehmungen wie z.B. "Geräusch", "Kälte", "Vibration", "Schmerz" und "Licht" unterschiedliche Exponenten. Welche Bedeutung hat  $J_0$ ? Warum haben Kälte- und Wärmewahrnehmung nicht denselben Exponenten trotz gleicher physikalischer Dimension (Temperatur)?
- 1-7 Erklären Sie den Unterschied zwischen räumlicher und zeitlicher Summation (Bahnung).
- 1-8 Erklären Sie den Unterschied zwischen Reiz und Wahrnehmung. Wie gelangt man, ausgehend von einem Reiz, zur Empfindung? Erläutern Sie die verschiedenen Zwischenstufen. Was bedeutet Attributierung?
- 1-9 Erklären Sie den Unterschied zwischen rezeptiven und perzeptiven Feldern.
- 1-10 Erklären Sie Funktion und Bedeutung von Divergenz und Konvergenz im Nervensystem am Beispiel.
- 1-11 Was besagt ein lineares, logarithmisches und exponentielles Modell, bezüglich der Wahrnehmung einer Reizintensität? Geben Sie für jedes der Modelle ein Beispiel an!

- 1-12 Welche der Begriffe "Adaptation", "Habituation", "Summation" und "Konditionierung" beschreiben typische Eigenschaften von Sinnesrezeptoren?
- 1-13 Welche der Begriffe "Modalität", "Qualität", "Räumlichkeit", "Zeitlichkeit" und "Intensität" zählen zu den Grunddimensionen der Sinneswahrnehmung?
- 1-14 Wie kann man die Grösse eines rezeptiven Feldes bestimmen, das zu einem sensorischen Neuron gehört?
- 1-15 Wie viele Stufen der Reizintensität können von einem Rezeptor vermittelt werden, wenn die Information über die Intensität 4 bit beträgt?

## 2. Thermorezeption

**Ziel:** Kenntnis der Reaktion von Thermorezeptoren und Abbildung einer einheitlichen physikalischen Realität auf eine dissoziierte Wahrnehmung, nämlich warm und kalt; praktische Bedeutung der Differentialempfindlichkeit von Rezeptoren; Unterschied zwischen Reizwahrnehmung und affektive Bewertungen (Empfindungen) wie Komfortgefühl.

### 2.1. Thermorezeption der Haut

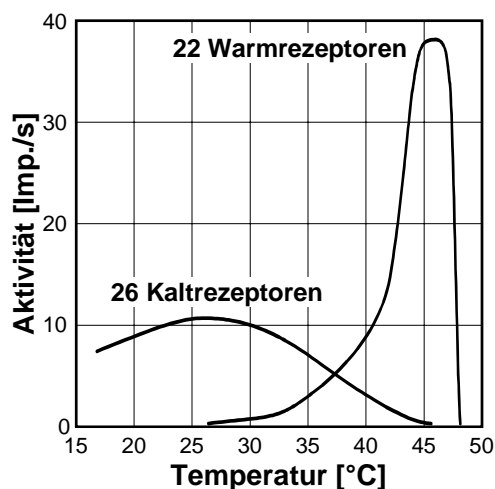


Es gibt einen Kältesinn und einen Wärmesinn ( $\neq$  Thermometer). Hinweise sind:

- Kalt- und Wärmepunkte (Blix 1883 & Goldscheider 1884). Versuch: Thermoden (z.B. grosser Nagel) mit Raumtemperatur erzeugen Kältsensation bei den Kaltpunkten z.B. auf dem Handrücken, weil Hauttemperatur  $>$  Raumtemperatur ist. Wärmepunkte: Finger und Lippen; Kaltpunkte siehe Bild. Beim Finger sind die Kaltpunkte in 2 mm, die Wärmepunkte in 20 mm Abstand.
- Kalt hat höhere neuronalen Leitungsgeschwindigkeit
- Es sind elektrophysiologisch spezifische Kalt- und Warmrezeptoren nachweisbar (vgl. nächstes Bild).

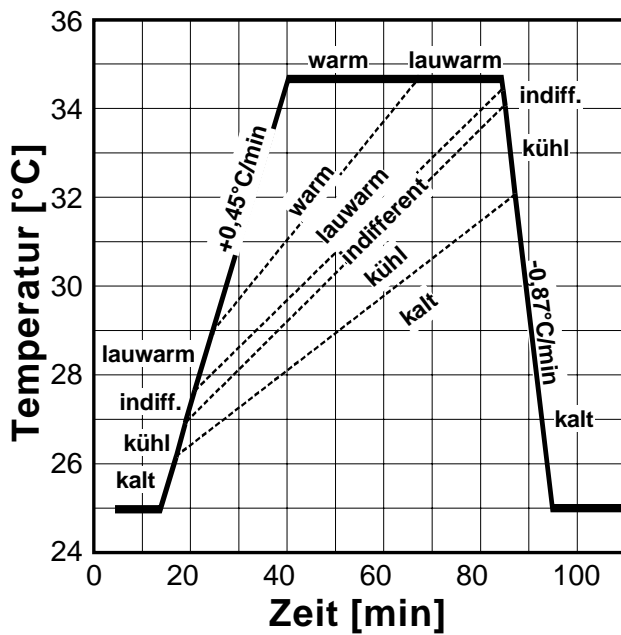
zentrale Verrechnung: Versuch: Nur Finger in warmes Bad und vergleichen wenn ganze Hand im Bad. Es folgt, dass es eine einheitliche Temperaturbefindlichkeit gibt. Es ist aber auch möglich, Aufmerksamkeit der Temperatur-Wahrnehmung auf einzelne Körperteile zu konzentrieren.

Konstanzmechanismus beim Fühlen der Wärme von Gegenständen: nach v. Campenhausen: „Verschiedene Hauttemperaturen machen sich bei der Beurteilung der Objekttemperatur ... kaum bemerkbar“.



Antwortverhalten von Kalt- und Warmrezeptoren in Abhängigkeit der Hauttemperatur: Warmrezeptoren werden durch Erwärmung aktiviert und durch Abkühlung gehemmt. Kaltrezeptoren verhalten sich entgegengesetzt.

## 2.2. Statische Temperaturwahrnehmung



Wärmewahrnehmung einer Versuchsperson (Vp) bei langsamer Änderung der Hauttemperatur: Die Abbildung zeigt, welche Wärmewahrnehmung eine Vp bei einer Änderung der Temperatur ihres Fusses beobachtete. Die Adaptation zeigt sich darin, dass die Wahrnehmung von warm nach lauwarm abfällt, wenn über längere Zeit der Wärmereiz konstant gehalten wird und dass beim Abkühlen die Wahrnehmung kühl und kalt schon bei höheren Temperaturen auftritt, als bei Erwärmung.

Zone der Indifferenztemperatur:

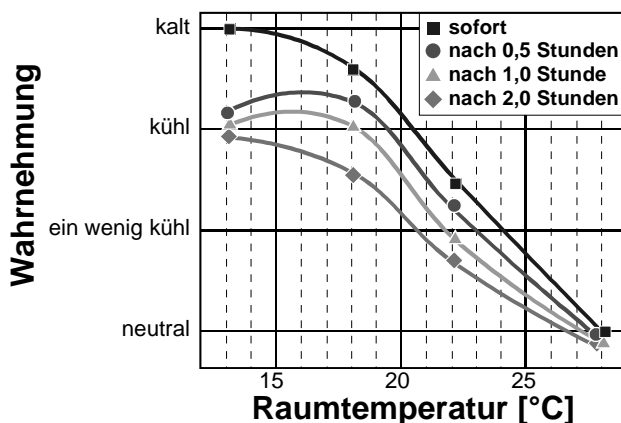
15 cm<sup>2</sup> Haut: 30°C – 36°C

ganzer Mensch: 33°C – 35°C

Schmerzempfindung: > 43°C – 44°C

und < 17°C

(aber vorher schon unangenehm)

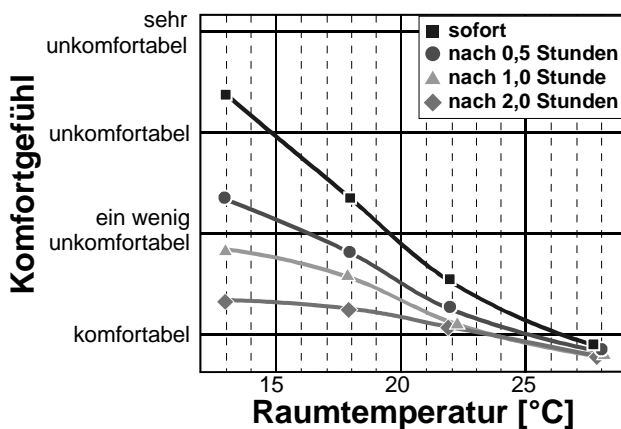


Adaptation:

1. Versuch: Hand in Bad bei 42°C halten: Nach einer Heisswahrnehmung folgt eine Warmwahrnehmung, die nicht verschwindet. Erst unterhalb der Indifferenztemperatur verschwindet auch diese.

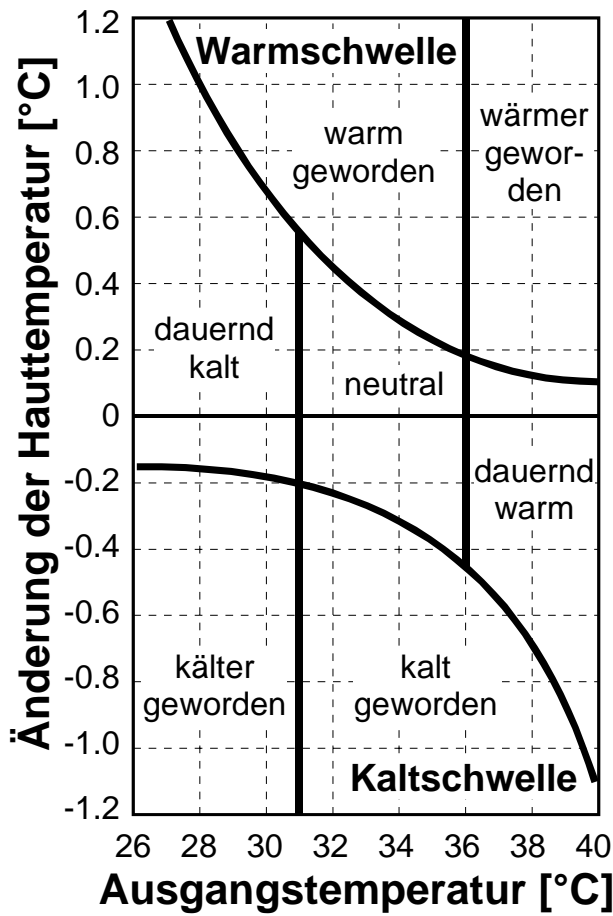
2. Versuch: In Bad steigen bei 33°C: Nach einer Warmwahrnehmung folgt Neutralwahrnehmung; in Bad steigen bei 28°C: Nach einer Kaltwahrnehmung folgt Neutralwahrnehmung.

3. Versuch: Weberscher Dreischalenversuch.



Dargestellt in diesem und dem vorangehenden Bild ist die Adaptation des ganzen Körpers an die Raumtemperatur. Es wird unterschieden zwischen Wahrnehmung und Empfindung (Komfortgefühl).

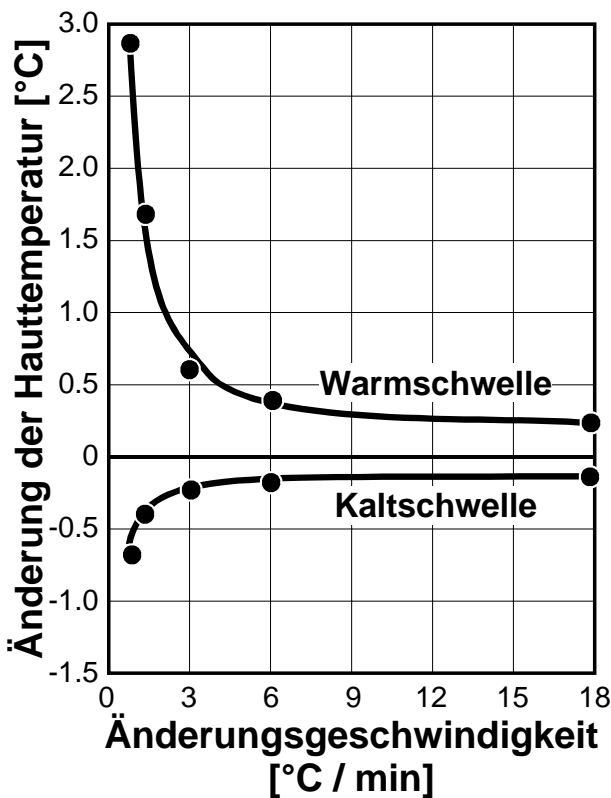
### 2.3. Dynamische Temperaturwahrnehmung



Drei Parameter bestimmen die dynamische Temperaturwahrnehmung:

1. der Ausgangstemperatur
2. der Änderungsgeschwindigkeit  $dT/dt$
3. der Grösse des Hautareals

Abhängigkeit der Warm- und Kaltschwellen von der Ausgangstemperatur der Haut: Ausgehend von den in der Abszisse angegebenen Temperaturen, auf die die Haut längere Zeit adaptiert wurde, muss sich die Hauttemperatur um den von 0 in der Ordinate ausgehenden Betrag ändern, bis eine Kalt- bzw. Warmempfindung auftritt. Das Diagramm gilt für alle Temperaturänderungen, deren Geschwindigkeit grösser als  $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ist.

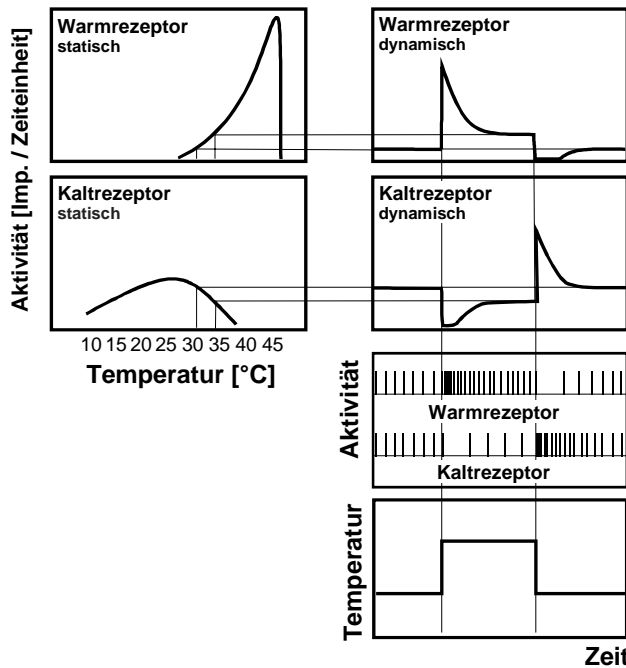


Abhängigkeit der Warm- und Kaltschwellen von der Geschwindigkeit der Temperaturänderung:

Dargestellt für eine Ausgangstemperatur von  $32^{\circ}\text{C}$ . Hier liegt möglicherweise ein Grund für Erkältungen: langsames Abkühlen wird lange nicht wahrgenommen.

Grösse des Hautareals: Ist dieses klein, ergibt sich eine höhere Schwelle. Das ist ein Hinweis auf zentrale Bahnung. Versuch: Reize auf beide Handrücken statt einen: Schwelle wird halbiert.

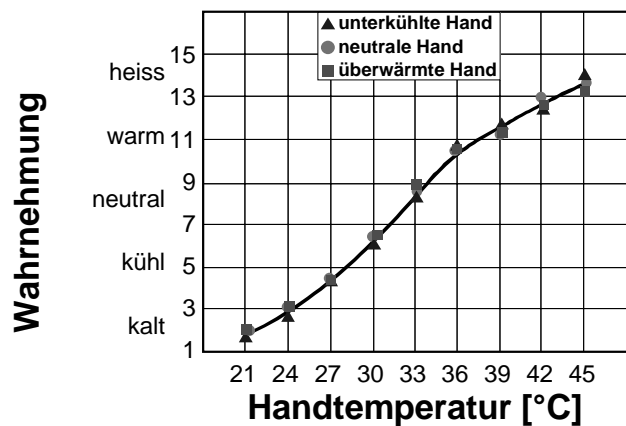
## 2.4. Rezeptoren



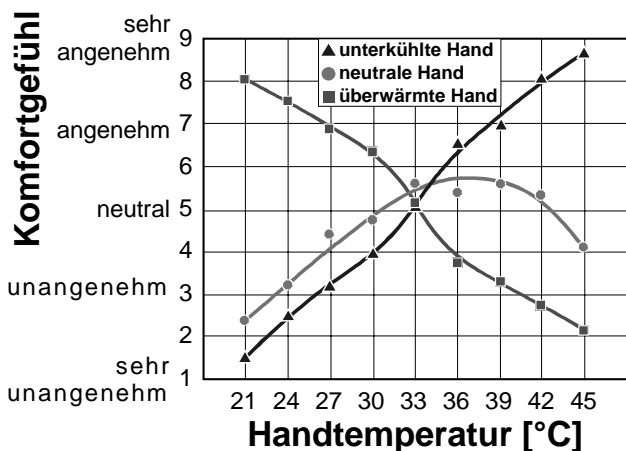
Statisches und dynamisches Verhalten eines spezifischen Wärme- und Kälterezeptors. Die Rezeptoren adaptieren nach einigen Sekunden, die Wahrnehmung aber erst nach Minuten. Das deutet auf Adaptationsvorgänge im Zentralnervensystem hin.

### Temperaturphänomene:

- paradoxe Kaltempfindung (evtl. reagiert Kaltrezeptor auf schnelle hohe Temperaturänderung). Das Phänomen ist auch physiologisch nachweisbar.
- Gänsehaut
- Kältewirkung von Menthol



Mittlere Urteilkategorien der Wärmeintensität als Funktion der Reiztemperatur der Hand bei drei Bedingungen interner Körpertemperatur.



Mittlere Urteilkategorien des Komfortgefühls als Funktion der Reiztemperatur der Hand bei drei Bedingungen interner Körpertemperatur. Jeder Punkt repräsentiert das Mittel von vier Versuchspersonen mit je vier Urteilen.

## 2.5. Thermophysiologie

Damit der Mensch als Warmblüter seine Körpertemperatur von ca. 37°C in einer sich klimatisch verändernden Umwelt und bei unterschiedlichen Arbeitsleistungen konstant halten kann, muss die aufgenommene und produzierte Wärme im Gleichgewicht zur abgegebenen Wärme stehen. Dieser Ausgleich der Wärmebilanz erfolgt unter anderem durch die Thermoregulation, einem physiologischen Regelkreis, analog zur Temperaturregelung einer Heizung mit einem Thermostaten.

### 2.5.1. Wärmebilanz

Bei der Einstellung eines thermischen Gleichgewichts, kommt es einmal zum Wärmetransport im Körper über das Blut und die Atemluft und zum Wärmeübergang zwischen Körperoberfläche und Umgebung (Fig. 2-1). Folgende vier Wärmeübergangsformen werden unterschieden:

- Wärmeleitung (Konduktion)
- Konvektion
- Verdunstung (Evaporation)
- Strahlung (Radiation)

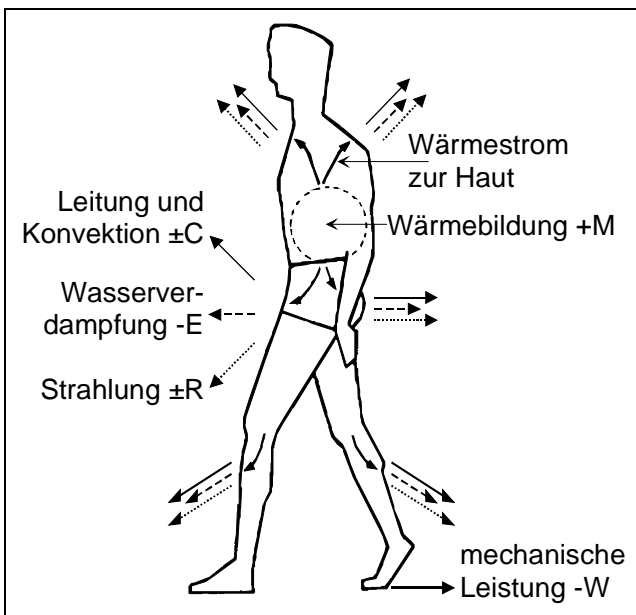


Fig. 2-1: Wege der Wärmeabgabe des Menschen.

Aufgrund der geringen Kontaktflächen zwischen Körper und festen Stoffen besitzt die Wärmeleitung einen fast vernachlässigbaren Einfluss. Ein weiterer kleiner Teil der Wärmeabgabe erfolgt auch über die ausgeatmete Luft.

Die pro Sekunde umgesetzte Energie – der Energieumsatz oder der Wärmefluss – wird in Watt pro m<sup>2</sup> Körperoberfläche angegeben. Die

Körperoberfläche  $A_{Du}$  kann nach DuBois [1916] durch folgende Formel geschätzt werden:

$$A_{Du} = 0.202 \cdot m^{0.425} \cdot h^{0.725}$$

mit dem Körpergewicht  $m$  in kg und der Körperlänge  $h$  in m.

Die Wärmebilanz ergibt sich dann zu:  
 $M + R + C + E = S$  (in  $W/m^2$ ).

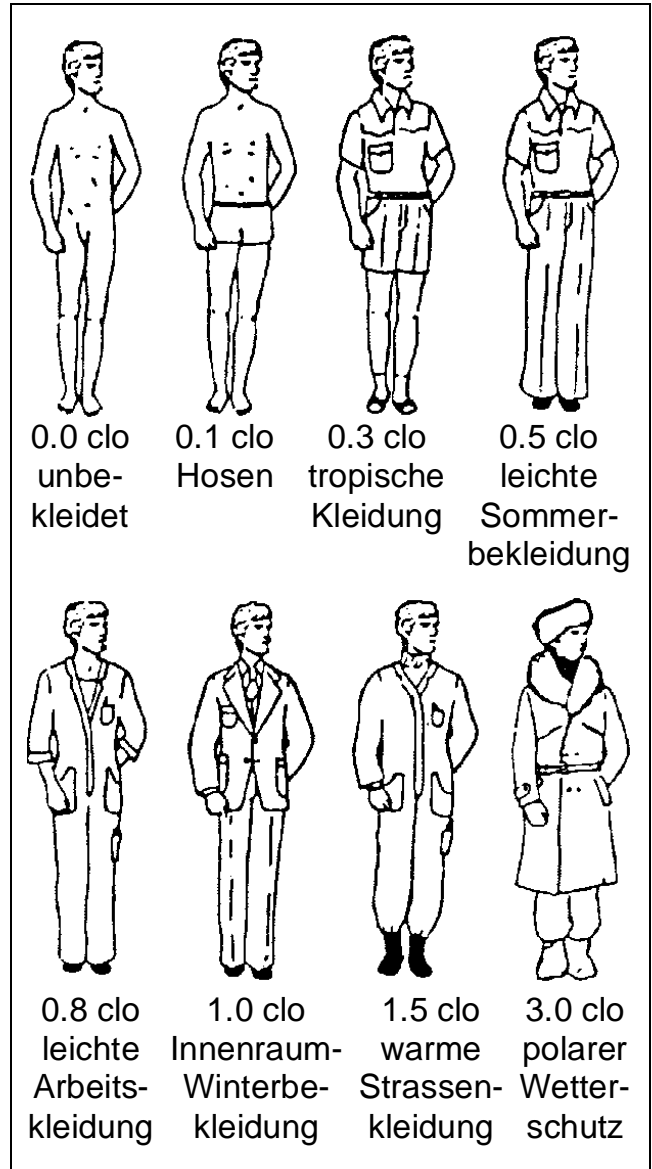


Fig. 2-2: Isolationswerte unterschiedlicher Bekleidungen in clo.

Die durch den Stoffwechsel und die Muskelaktivität bedingte metabolische Rate  $M$  ist immer positiv. Wärmeabgaben bedeuten negative, Wärmeaufnahmen positive Werte. Werte für  $E$  sind nie positiv.  $S$  bezeichnet die Wärmespeicherung im Körper. Für thermischen Komfort muss diese Null sein (siehe Kap.0). Dies ist dann der Fall, wenn die physiologische Thermoregulation wirksam ist.



Bei Hitze arbeitsplätzen etwa, kann S positiv sein. Das bedeutet, dass sich der Körper immer stärker erwärmt und nach einer gewissen Zeit zu Hitzeerkrankungen wie z.B. Hitzschlag führen kann (siehe Kap.2.5.3). Im Gegensatz dazu ist in kalten Umgebungen S negativ (siehe Kap.0).

Wie schnell der Wärmeaustausch zwischen der Körperoberfläche und der Umgebung stattfindet, hängt von der Isolationswirkung der Kleidung ab. Die Art der Bekleidung spielt daher beim Wärmeaustausch eine wesentliche Rolle. Der Wärmeaustausch ist abhängig vom Isolationswert  $R_{cl}$  der Kleidung. Dieser wird oft mit der Einheit clo angegeben (siehe Fig. 2-2). 1 clo entspricht dem physikalisch definierten Isolationswert von  $0.155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$ . Für sitzende Tätigkeit in gepolsterten Stühlen (z.B. im Büro) sollte eine zusätzliche durch die Polsterung bedingte Isolation von 0.15 clo hinzugerechnet werden.

### 2.5.1.1. Metabolischen Rate M

Der Stoffwechsel bzw. der Metabolismus des Körpers und die Tätigkeiten bzw. die Muskelarbeit des Menschen erzeugen im Körper Wärme (=metabolische Rate). Diese pro Sekunde erzeugte Wärmeenergie wird ebenfalls in Watt pro  $\text{m}^2$  auf die Körperoberfläche bezogen. Ein anderes Mass für die Wärmeproduktion ist die metabolische Einheit met. Ein met entspricht der Energieabgabe des ruhig sitzenden Menschen und beträgt  $58 \text{ W/m}^2$  (siehe Tab. 2-1).

Tab. 2-1: Pro Quadratmeter Körperoberfläche durch Metabolismus und Tätigkeiten erzeugte Wärme (Metabolische Rate).

Tätigkeit	Wärmefluss	
	[met]	[W/m <sup>2</sup> ]
liegend	0,8	46
ruhig sitzend	1,0	58
sitzend (Büro, Wohnhaus, Labor, Schule)	1,2	70
entlastet, stehend	1,2	70
leicht, stehend (Geschäft, Labor, leichte Industriearbeit)	1,6	93
mittel, stehend (Verkäufer, Hausarbeit, Maschinenarbeit)	2,0	116
schwer, stehend (schwere Maschinenarbeit, Hallenarbeit)	3,0	174

Wird im Arbeitsprozess dynamische Muskelarbeit erbracht (z.B. Drehen einer Kurbel), wird diese teilweise dem Körper als mechanische

Leistung W entzogen. Sie muss nicht mehr durch thermische Prozesse abgeführt werden. Für Berechnungen wird im allgemeinen die metabolische Rate M um diesen Betrag vermindert.

### 2.5.1.2. Konvektion C

Ist die Temperatur der Körperoberfläche (Kleideroberfläche)  $t_{cl}$  grösser als die mittlere Temperatur der umgebenden Luft  $t_a$ , wird konvektive Wärme C [ $\text{W/m}^2$ ] von der Körperoberfläche an die Luft abgegeben. Im umgekehrten Fall nimmt der Körper konvektive Wärme auf, welche zusätzlich zur metabolischen Wärme durch Schwitzen wieder abgegeben werden muss. Die Konvektion darf nicht mit der Wärmestrahlung verwechselt werden. Sie ist abhängig von der Luftgeschwindigkeit, der Temperaturdifferenz zwischen Körper und Luft sowie von der Isolation der Bekleidung.

### 2.5.1.3. Wärmestrahlung R

Der Mensch kann aus seiner Umgebung Wärme durch Wärmestrahlung aufnehmen oder abgeben. Es handelt sich um Infrarotstrahlung, welche auch ohne die Luft Wärme übertragen kann. Ebenfalls wie die Konvektion ermöglicht die Wärmestrahlung einen Ausgleich des menschlichen Wärmehaushalts. An Hochöfen jedoch oder im direkten Sonnenlicht erfolgt eine Wärmeaufnahme durch den menschlichen Körper, da deren Strahlungstemperatur höher ist als die der Körper- bzw. Kleideroberfläche.

Der durch die Wärmestrahlung bedingte Wärmestrom wird entweder durch die effektive Bestrahlungsstärke R in  $\text{W/m}^2$  oder durch die mittlere Flächenstrahlungstemperatur  $\bar{t}_r$  in  $^\circ\text{C}$  gemessen. Die Umrechnung zwischen den beiden Grössen erfolgt mit den üblichen Gesetzen für Strahlungsaustausch oder mit der folgenden vereinfachten Formel, wobei der Mensch als Wärmestrahler mit einer Temperatur von  $32^\circ\text{C}$  und einem Emissionsgrad von 0.95 angenommen wird:  $R = 0.95 \cdot 4.7 \cdot (32^\circ\text{C} - \bar{t}_r)$ .

Bei grosser Wärmestrahlung (Hochöfen) müssen Schutzbrillen, Abschirmungen und Schutzkleider gegen Verbrennungsschäden verwendet werden.

### 2.5.1.4. Verdunstung E

Sobald keine ausreichende Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung mehr möglich ist, um den Körper im thermischen Gleichgewicht zu halten, beginnt der Körper zu schwitzen. Die Schweissverdunstung spielt dann die

Hauptrolle bei der Regulierung des menschlichen Wärmehaushalts. 1 Gramm pro Sekunde und  $m^2$  Körperoberfläche verdunsteter Schweiß entspricht einer Wärmeabgabe von  $2500 \text{ W/m}^2$ .

Je grösser der Hautfeuchtigkeitsgrad  $w$ , d.h., der Grad der Benetzung der Körperoberfläche ist, desto mehr Energie kann pro Sekunde durch Verdunsten abgegeben werden. Je nach dem, wie schnell die verdunstete Flüssigkeit durch die produzierte Schweißmenge ersetzt wird, nimmt der Hautfeuchtigkeitsgrad zu oder ab und stabilisiert sich auf einen Gleichgewichtswert. Er bestimmt mit, ob ein Klima als behaglich empfunden wird. Wenn zu stark geschwitzt wird, trägt der überschüssige, abtropfende Schweiß nichts zur Wärmeregulation des Körpers bei.

Die verdunstete Menge hängt ab, von der Luftgeschwindigkeit, von der Isolation und Wasserdurchlässigkeit der Bekleidung und von der Wasseraufnahmefähigkeit der Luft. Verdampfungswärme kann nur abgegeben werden, wenn der Dampfdruck im Raum geringer ist als derjenige direkt über dem Schweißfilm. Dampfdrücke können mit Hilfe eines psychrometrischen Diagramms aus der Temperatur und der relativen Feuchte ermittelt werden. Über dem Schweißfilm ist die Luft 100% gesättigt und ihre Temperatur entspricht derjenigen der Körperoberfläche. Beispielsweise kann bei einer Körperoberflächentemperatur von  $36^\circ\text{C}$ , in einem Raumklima mit  $40^\circ\text{C}$  und 80% Feuchte keine Wärme durch Schwitzen abgegeben werden, weil beide Dampfdrücke gleich gross sind ( $=5900 \text{ Pa}$ ).

### 2.5.2. Thermoregulation

Die physiologische (autonome) Thermoregulation erfolgt mittels zweier miteinander verknüpfter Regelkreise (Fig. 2-3). Menschliche Temperaturfühler (Thermorezeptoren) befinden sich auf der Hautoberfläche bzw. im Gehirn (Hypothalamus) und messen die Hauttemperatur (Schalentemperatur) bzw. die Kerntemperatur. Die physiologische Thermoregulation wird unterstützt durch Verhaltensregulation und in Gebäuden durch technische Regulation mittels Heizung und Kühlung (siehe Fig. 2-13).

Die beiden Körperbereiche Schale und Kern haben im allgemeinen nicht die gleiche Temperatur. In kalten Umgebungen kann die Hauttemperatur mehr als  $10^\circ\text{C}$  unter der Kerntemperatur liegen (Fig. 2-4). Eine maximale Wärme-

isolation liegt vor, wenn die Schalentemperatur  $6^\circ\text{C}$  geringer ist als die Kerntemperatur.

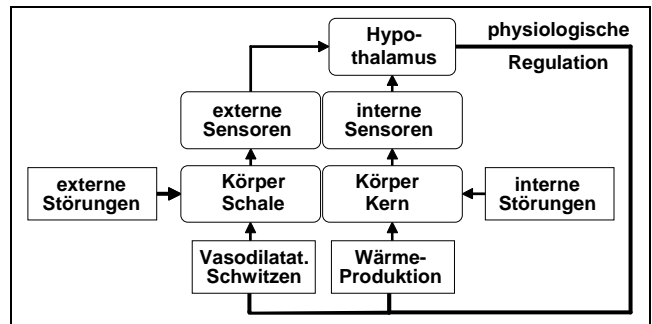


Fig. 2-3: Schema der physiologischen Thermoregulation.

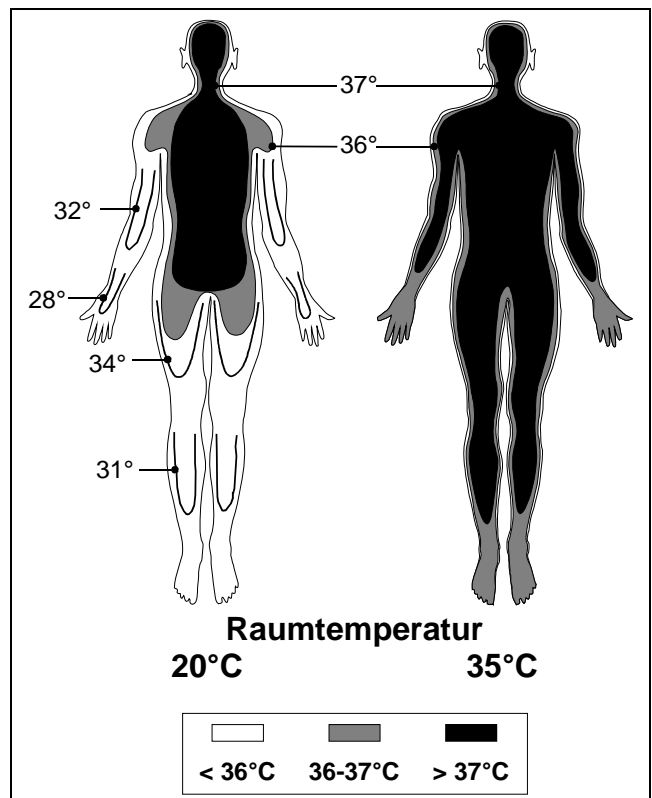


Fig. 2-4: Isothermen der Körperschalen (schematisch). Wenn sich die Extremitäten unter die Indifferenztemperatur abkühlen, findet eine andauernde Kaltwahrnehmung statt (Bsp.: kalte Füsse).

Bei Sensorwerten der Thermorezeptoren über dem Sollwert versucht der Organismus durch vermehrtes Schwitzen, durch Erhöhung der Pulsfrequenz und damit durch einen schnelleren Wärmeaustausch zwischen Kern und Oberfläche sowie durch Erweitern der peripheren Gefässe (Vasodilatation, Hautrötung) die Wärmeabgabe zu vergrössern.

Signalisieren die Thermorezeptoren zu geringe Temperatur, versucht der Körper die Wärmeabgabe durch Aufstellen der Haare (Gänsehaut) und damit durch Bildung eines Luftpolsters sowie durch Verengen der peripheren Blutgefässe

(Vasokonstriktion) zu verringern. Ausserdem wird durch Kältezittern (Frösteln) und einer Verstärkung der Verbrennungsprozesse in der Leber die Wärmeproduktion erhöht.

**2.5.3. Hitzearbeit**

Schon bei geringen Abweichungen vom thermischen Gleichgewicht kommt es bei Wärmeüberschuss zu unbehaglichen Wärmeempfindungen. Während Unbehaglichkeit bereits zu erhöhter Reizbarkeit und Konzentrationsmangel führt, fällt bei noch grösserer Hitze die Leistung für Geschicklichkeit fordernde Arbeiten ab und die Unfälle nehmen zu. In Fig. 2-5 ist die Abnahme der Leistung mit zunehmender Temperatur für drei Luftfeuchtigkeiten dargestellt.

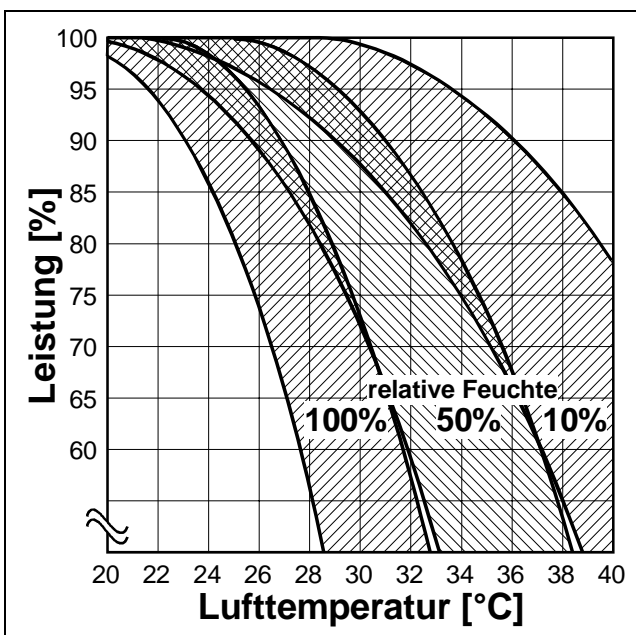


Fig. 2-5: Bereiche körperlicher und geistiger Leistungsminderung durch Hitze für verschiedene Luftfeuchten (stark vereinfacht).

Ein weiterer Anstieg der Wärme führt zu Hitze-stau mit Störungen des menschlichen Wasser- und Salzhaushalts und einer starken Belastung von Herz und Kreislauf. Symptome von Hitze-erkrankungen sind neben einer erhöhten Körpertemperatur folgende:

- Übelkeit
- Schwindel
- Müdigkeit
- Schmerzen in Armen und Beinen.
- Kopfschmerzen
- Verwirrtheit
- Krämpfe

Bei schwerer Arbeit in grosser Hitze kommt der Schweissabsonderung die entscheidende Bedeutung für den Ausgleich des Wärmehaushalts zu. Es soll daher alle 10 bis 15 Minuten ein Becher Flüssigkeit (Wasser, Tee, nicht aber Kaffee) getrunken werden. Weitere zu beach-

tende Punkte sind in SUVA [1998] aufgeführt. Der Wasserverlust darf ein vorgegebenes Maximum nicht überschreiten (Tab. 2-2). Es sind häufige und längere Pausen vorzusehen.

Gefahr besteht auch, wenn der maximal erlaubte Hautfeuchtigkeitsgrad überschritten wird. Unter Hautfeuchtigkeitsgrad wird der Grad der Benetzung der Körperoberfläche mit Schweiss verstanden. Ist dieser nahe bei 100%, trägt zusätzliches Schwitzen nichts mehr zur Abkühlung bei, da der Schweiss keine zusätzliche Verdunstungsfläche mehr findet und abtropft.

Tab. 2-2: Maximalwerte für Hitzearbeit von 5 bis 8 Stunden Dauer. Akklimatisierte Personen zeichnen sich durch ihre schnellere und ökonomischere Thermoregulation aus. Beim Alarmwert ist noch kein normaleistungsfähiger Arbeiter in Gefahr, beim Gefahrenwert sind schon einige, obwohl leistungsfähige Menschen gefährdet.

Grenzen:	nicht akklimatisierte Personen		akklimatisierte Personen	
	Alarm	Gefahr	Alarm	Gefahr
maximaler Wasserverlust [g]	2600	3250	3900	5200
maximaler Hautfeuchtigkeitsgrad [%]	85	85	100	100
maximale Schweissrate [g / h]				
ruhend	260	390	520	780
arbeitend	520	650	780	1040
max. Wärmespeicherung im Körper [W h/m <sup>2</sup> ]	50	60	50	60

Falls an einem Arbeitsplatz die Maximalwerte von Tab. 2-2 überschritten werden, muss die Arbeits- bzw. Schichtdauer entsprechend verkürzt werden (vgl. SUVA [1998]). Die Beanspruchung der einzelnen Personen während der Hitzearbeit kann mit Hilfe physiologischer Beanspruchungsgrössen beobachtet werden. Es kommen dafür die Rektaltemperatur, die Schweissabgabe, die Herzfrequenz, der Sauerstoffverbrauch und die Messung des Erholungspulses in Frage (siehe auch ISO 8996).

**2.5.4. Kältearbeit**

Die letale Kerntemperatur liegt zwischen 25 und 27°C. Die Hauttemperatur reagiert wegen eintretender Vasokonstriktion unter Kälte sehr rasch. Es folgt eine periphere Durchblutungs-

behinderung, dem aber Muskelzittern durch Kälte (Frösteln) entgegensteht. Diese widersprüchliche Situation bedingt eine Blutdruckreaktion. Sowohl Laboruntersuchungen (2 stündige Exposition bei 5°C, 0.1 clo Bekleidung) als auch Feldstudien in Kühlhäusern (bei -28°C, in Kälteschutzkleidung) ergaben eine Erhöhung des systolischen Blutdrucks um 20, des diastolischen Blutdrucks um 10 mm Hg.

Bei der Arbeit in Kühlhäusern zeigt die Hauttemperatur trotz Kälteschutzkleidung und weitgehend konstanter Rektaltemperatur eine Abnahme an der Hand um 5°C, am Fuss um rund 10°C und an den Zehen um mehr als 15°C. Die Rückkehr der Hauttemperatur in klimaneutraler Umgebung dauert relativ lange. Man muss bis zu einer halben Stunde warten. Dieser Faktor ist bei der Arbeitsgestaltung zu berücksichtigen.

Die Geschicklichkeit und damit die Leistung bei manuelle Tätigkeiten sinkt mit abnehmender Hauttemperatur der Hand. Dies macht sich besonders bei schwierigen Arbeiten bemerkbar (Fig. 2-6). Muss bei noch niedrigeren Temperaturen zur Verhinderung von Hautschädigungen

Schutzkleidung getragen werden, kann die Leistungsfähigkeit wegen mechanischer Behinderung noch weiter abnehmen.

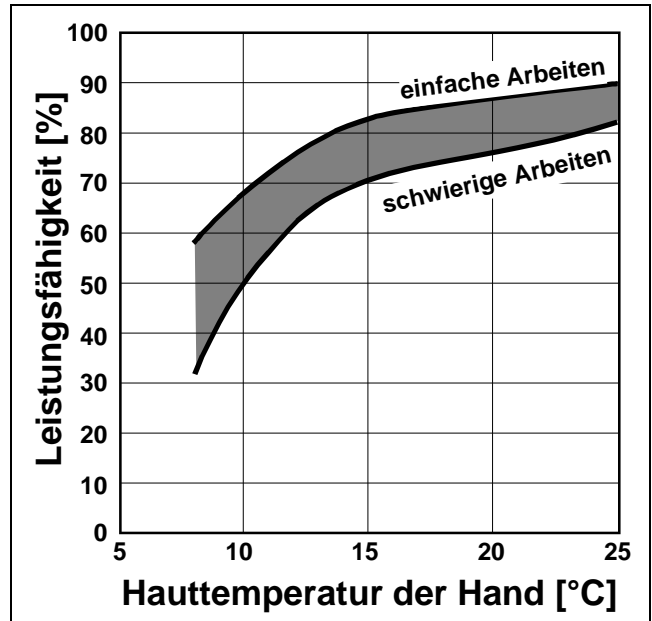


Fig. 2-6: Leistungsfähigkeit für manuelle Tätigkeiten mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad in Abhängigkeit der Handtemperatur.

## 2.6. Globaler thermischer Komfort

In diesem Kapitel wird der globale, das heisst, der Ganzkörper-Komfort behandelt. Für thermischen Komfort ist es aber auch erforderlich, dass kein lokales Unbehagen am Körper entsteht, wie z.B. Zugluft oder asymmetrische Wärmestrahlung. Sie sind Thema des nächsten Hauptkapitels.

Die Ausführungen über die Wärmebilanz des Menschen haben gezeigt, dass folgende vier Klimagrössen den thermischen Komfort wesentlich beeinflussen:

- Raum- bzw. Lufttemperatur  $t_a$  [°C]
- Wärme- bzw. IR-Strahlung  $t_r$  [°C]
- Windgeschwindigkeit  $v$  [m/s]
- relative Feuchte RH [%]

### 2.6.1. Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit bzw. der thermische Komfort ist das Gefühl welches Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt. Das bedeutet, dass man einen Klimazustand als thermisch neutral für den ganzen Körper empfindet, d.h., nicht weiss, ob man eine niedrigere oder höhere Temperatur vorziehen würde. Diskomfort bezeichnet einen davon abweichenden unbehaglichen Klimazustand.

Tab. 2-3: Einige mögliche Bewertungsskalen, welche in der Forschung zum thermischen Komfort verwendet wurden. PMV und PPD werden in separaten Kapiteln erklärt.

Beurteilung	Akzeptanz	Präferenz	PMV	PPD
heiss	inakzeptabel	will es kühler	+3	99%
warm			+2	75%
leicht warm	akzeptabel	will keine Änderung	+1	25%
neutral			0	5%
leicht kühl			-1	25%
kühl	inakzeptabel	will es wärmer	-2	75%
kalt			-3	99%

Für die Beurteilung der klimatischen Verhältnisse in einem Grossraum reicht eine Messung der Klimafaktoren im allgemeinen nicht aus. Neben einer Abschätzung der körperlichen Aktivität, welche im Rahmen einer Arbeitsanalyse erfolgt, können auch individuell unterschiedliche Bedürfnisse mit einem Fragebogen erfasst werden. Fragen zu lokalen Klimawirkungen werden ergänzt durch eine Ratingskala bezüglich des globalen thermischen Komforts (Tab. 2-3).

## 2.6.2. Komfortbedingungen

Die Wärmebilanzgleichung wurde in vielen Studien untersucht, mit dem Ziel einen einzigen Index zu entwickeln, welcher Abweichungen vom thermischen Gleichgewicht signalisiert oder sogar eine subjektive Beurteilung gemäss Tab. 2-3 voraussagt. Der Index soll also den mehrdimensionalen „Klimaraum“ bestehend aus Lufttemperatur, Strahlung, Windgeschwindigkeit und relativer Feuchte zu einem einzigen Klimasummenmass kombinieren. Falls ein Messgerät in der Lage ist, einen solchen Index anzuzeigen, wäre es einfach, eine Klimasituation vor Ort zu beurteilen.

Man kann unterscheiden in Indices, welchen eine Analyse des Wärmeaustauschs am Menschen mit den fundamentalen Gesetzen der Thermodynamik zugrunde liegen und in solche, welche empirisch aus Korrelationen zwischen Klimagrössen und subjektiven Beurteilungen gemäss Tab. 2-3 hervorgegangen sind. Ein Beispiel für die erste Methode sind die Gleichungen in ISO 7933, die unter anderem zur Ermittlung der Wärmeerzeugung  $S$  im Körper und zur Berechnung der erforderlichen Schweissrate herangezogen werden können. Beispiele für die zweite Methode sind die Effektivtemperatur ET oder die WBGT. Dem PMV-Index nach Fanger [1970] liegt eine Kombination beider Methoden zugrunde.

ET und WBGT werden mit Hilfe der zwei abgeleiteten Grössen Globetemperatur  $t_g$  und Feuchttemperatur  $t_{wn}$  ermittelt. Das Globethermometer besteht aus einem Thermometer, dessen Fühler von einer geschwärzten Kugel umgeben ist. Es soll den menschlichen IR-Strahlungsaustausch simulieren. Die Feuchttemperatur ist die mit einem Psychrometer bestimmte Temperatur des befeuchteten Thermometers.

### 2.6.2.1. ET: Effektivtemperatur

Die Effektivtemperatur ist ein altes Summenmass, welches die Raumtemperatur, die Feuchte und die Luftbewegung miteinander kombiniert [Houghton, Yaglou, 1923]. Es ist auch heute noch weit verbreitet. Man unterscheidet die Normal-Effektivtemperatur NET, die für Personen mit üblicher Strassenkleidung gilt, und die Basis-Effektivtemperatur BET für Personen mit unbedecktem Oberkörper. Ihr Wert wird mittels Nomogrammen ermittelt. Ein Raum ohne Luftbewegung mit 25°C und einer Feuchte von 50% hat beispielsweise eine Effektiv-

temperatur von 22°C. In einem Klima mit 100% Luftfeuchte und 0.1 m/s Windgeschwindigkeit stimmen Raumtemperatur und Effektivtemperatur überein. Falls die Strahlungstemperatur stark von der Raumtemperatur abweicht, sollte bei der Bestimmung der Effektivtemperatur die Globetemperatur statt die Raumtemperatur verwendet werden. Die Effektivtemperatur wurde sukzessive weiterentwickelt. In den USA wird die neue Effektivtemperatur  $ET^*$  verwendet. Für weitere Informationen zu  $ET^*$  siehe bei Gagge et al. [1986].

### 2.6.2.2. WBGT: Wet Bulb Globe Temperature

Die WBGT ist ein einfaches Summenmass, welches die Feuchte, die Wärmestrahlung und die Raumtemperatur miteinander kombiniert (siehe ISO 7243). Die Bedeutung der WBGT ergibt sich aus der Tatsache, dass sie als Arbeitsnorm von der ISO empfohlen wurde. Sie berücksichtigt weder den Energieumsatz noch die Bekleidung des Menschen. Es gilt ohne Sonnenbelastung:

$$WBGT = 0.7 \cdot t_{wn} + 0.3 \cdot t_g$$

und mit Sonnenbelastung:

$$WBGT = 0.7 \cdot t_{wn} + 0.2 \cdot t_g + 0.1 \cdot t_a$$

### 2.6.2.3. PMV: Diskomfort-Index

Ausführliche Untersuchungen zum Klimakomfort wurden von Fanger [1970] in Klimakammern an über 1300 Testpersonen durchgeführt. Sie zeigten, dass zum Erreichen einer thermischen Behaglichkeit für den ganzen Körper drei Bedingungen erfüllt sein müssen:

- Die vom Körper abgeführte Wärmemenge befindet sich im Gleichgewicht mit seiner Wärmeproduktion. Es findet kein Wärmeverlust und keine Wärmespeicherung im Körper statt:  $S = 0 \text{ W/m}^2$ .
- Mit zunehmender körperlicher Aktivität  $M$  in  $\text{W/m}^2$  wird eine tiefere mittlere Hauttemperatur  $\bar{t}_{sk}$  in °C bevorzugt. Fangers Untersuchungen ergaben folgenden Zusammenhang:  $\bar{t}_{sk} = 35.7^\circ\text{C} - 0.0275 \cdot M$ . Im Büro mit  $M=70 \text{ W/m}^2$  ergibt dies eine mittlere Hauttemperatur von 33.8°C.
- Mit zunehmender körperlicher Aktivität  $M$  [ $\text{W/m}^2$ ] wird eine erhöhte Schweissrate und damit eine erhöhte Wärmeabgabe  $E$  [ $\text{W/m}^2$ ] durch Verdunstung bevorzugt. Körperlich aktive Personen bevorzugen offenbar keine so stark gekühlte Umgebung, dass sie nicht mehr Schwitzen müssen. Die Untersuchun-

gen ergaben für metabolische Raten M bis 174 W/m<sup>2</sup> (=3 met) folgendes:

$E = 0.42 (M - 58.15 \text{ W/m}^2)$ . Für Bürotätigkeiten ist dies kaum noch von Bedeutung und Schwitzen daher kein Erfordernis für Behaglichkeit.

Die Abgabe von Verdunstungswärme gemäss c) korreliert stark mit dem Hautfeuchtigkeitsgrad w (Benetzungsgrad der Körperoberfläche). Die Behaglichkeit hängt daher auch mit w zusammen (Tab. 2-4).

Tab. 2-4: Die Behaglichkeit der thermischen Belastung bei verschiedenen Hautfeuchtigkeitsgraden (Gage, 1981).

Hautfeuchtigkeit	Bewertung
0.0 < w < 0.2	behaglich
0.2 < w < 0.5	leicht behaglich
0.5 < w < 0.7	unbehaglich
0.7 < w < 1.0	stark unbehaglich

Fanger konnte die drei Komfortbedingungen so umformen, dass ein Diskomfort-Index, das sogenannte PMV berechnet werden kann (siehe Fanger 1970 und ISO 7730). Das vorausgesagte mittlere Urteil PMV (predicted mean vote) ist eine Zahl, die den Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine grosse Personengruppe anhand der 7-stufigen Klimabeurteilungsskala gemäss Tab. 2-3 voraussagt.

**2.6.2.4. PPD: Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener**

Das PMV sagt den Durchschnittswert der Klimabeurteilung einer grossen Gruppe dem gleichen Umgebungsklima ausgesetzter Personen voraus. Einzelne Urteile streuen um diesen Durchschnittswert, und es ist nützlich, die Anzahl der Personen vorherzusagen, die das Umgebungsklima wahrscheinlich als zu warm oder zu kalt empfinden werden. Der PPD stellt eine quantitative Voraussage der Anzahl der mit einem bestimmten Klima unzufriedenen Menschen dar (Fig. 2-7 und Tab. 2-3).

Der PPD zeigt, dass für  $-0.5 < PMV < +0.5$  das Umgebungsklima von 90% der Personen akzeptiert wird. In der Praxis zeigt sich aber, dass oft eine grössere Unzufriedenheit mit dem Raumklima vorhanden ist. Die PMV/PPD-Methode berücksichtigt nur die physiologische Thermoregulation, nicht aber das Verhalten und die psychologisch erklärbaren Erwartungen der Personen am Arbeitsplatz (siehe dazu Kap.2.8).

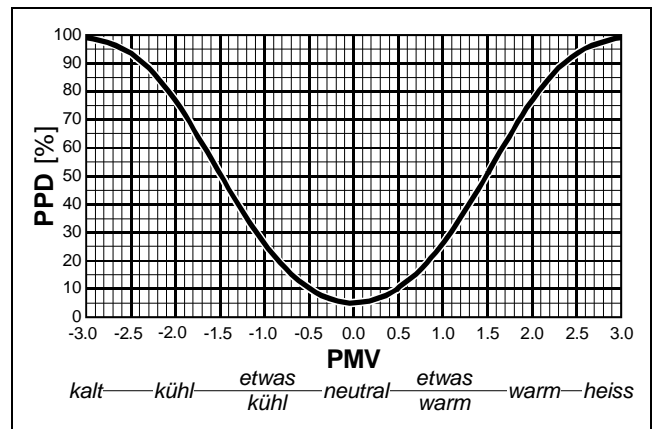


Fig. 2-7: Aus dem vorhergesagten mittleren Urteil PMV ermittelter Prozentsatz thermisch unzufriedener Personen PPD.

**2.6.3. Komfortklima**

Die im folgenden aufgeführten Empfehlungen zu einzelnen Klimaparametern beruhen weitgehend auf dem PMV-Index. Zu beachten ist, dass zusätzlich lokale Klimawirkungen beachtet werden müssen und dass mit den Empfehlungen nicht unbedingt individuellen Bedürfnissen entsprochen wird. Der PMV-Index dient hauptsächlich zur Voraussage der Komfortbeurteilung ganzer Personengruppen.

**2.6.3.1. Lufttemperatur**

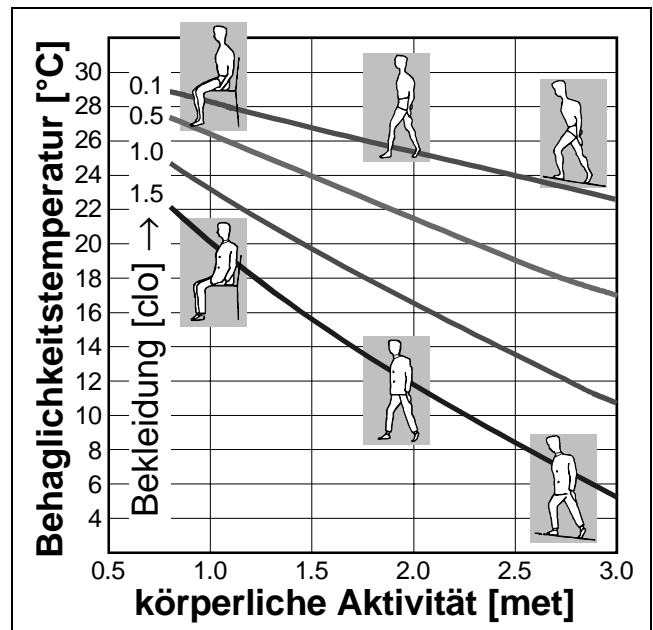


Fig. 2-8: Abhängigkeit der Behaglichkeits- oder Komforttemperatur des Menschen von der körperlichen Arbeit und der Bekleidung.

Die Umgebungstemperatur beeinflusst an vielen Arbeitsplätze massgebend die thermische Belastung. Der Körper gibt abhängig von der Isolationswirkung der getragenen Kleidung ständig Wärme an die Umgebungsluft ab, so-

lange diese kälter als die Oberflächentemperatur des Körpers ist.

Je schwerer die körperliche Arbeit ist und je stärker die damit verbundene Stoffwechsellätigkeit, um so kühler muss die Umgebung sein, bei welcher sich der arbeitende Mensch wohl fühlt. In Fig. 2-8 sind Beispiele der Behaglichkeitstemperatur für verschiedene Tätigkeiten und Bekleidungen dargestellt. In Arbeitsräumen mit überwiegend sitzender Tätigkeit soll die Raumtemperatur im Winter zwischen 20°C und 24°C liegen. Im Sommer wird ein Bereich von 23°C bis 26°C empfohlen.

### 2.6.3.2. Strahlungstemperatur

Eines der Hauptprobleme an vielen Büroarbeitsplätzen ist der ungenügende Schutz vor Sonneneinstrahlung. Auch wenn der Raum klimatisiert ist, kann es für die Arbeitenden zu übermässiger Wärmeentwicklung kommen. Ein Sonnenschutzsystem sollte in der Lage sein, sowohl klimatisch ausgleichend auf den Wärmeübergang von der Aussenluft nach innen zu wirken, als auch vor der Infrarotstrahlung der Sonne zu schützen. Untersuchungen zeigten, dass sich besonders aussenliegende Lamellenstoren oder Stoffstoren dafür eignen.

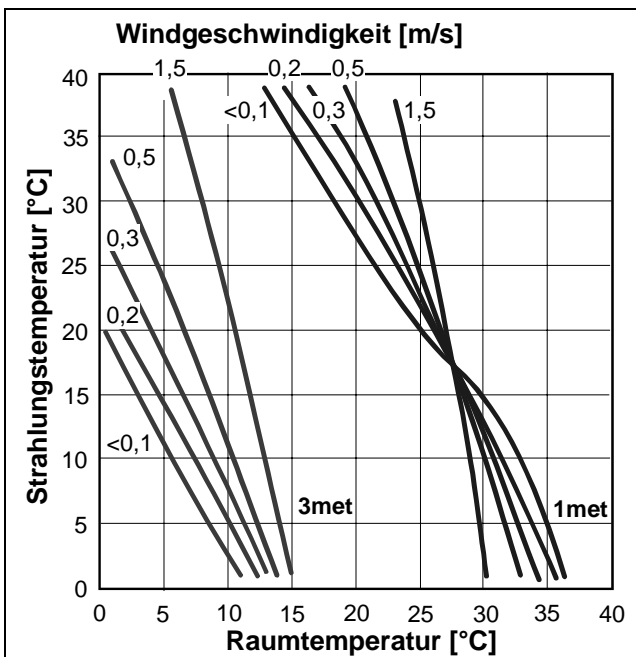


Fig. 2-9: Komfortable Klimakonfiguration für eine Kleidung mit 1 clo Isolationswert.

Die Strahlungstemperatur der Wände kann ungünstige Raumlufttemperaturen zum Teil kompensieren: Fig. 2-9. Als Faustregel gilt, dass die Differenz zwischen Strahlungstemperatur (Wandtemperatur) und Lufttemperatur weniger

als 3-4°C betragen muss, wenn Diskomfort vermieden werden soll.

Der Einfluss der Strahlungstemperatur  $t_r$  kann für den thermoregulierten Bereich durch die Verwendung der operativen Temperatur  $t_o$  berücksichtigt werden:  $t_o = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot t_r$ .  $A$  ist ein Koeffizient, abhängig von der Luftgeschwindigkeit  $v$ :

$$A=0.5 \text{ für } v < 0.2 \text{ m/s,}$$

$$A=0.6 \text{ für } 0.2 \text{ m/s} < v < 0.6 \text{ m/s,}$$

$$A=0.7 \text{ für } 0.6 \text{ m/s} < v.$$

Bei geringen Luftgeschwindigkeiten sind also Strahlungstemperatur und Raumtemperatur  $t_a$  gleichwertig. Je grösser  $v$  ist, desto wichtiger wird die Raumtemperatur.

### 2.6.3.3. Luftbewegung

Die thermische Situation verbessert sich, wenn ein leichter Wind weht. Der Wind entfernt die fest am Körper haftende schweissangereicherte und vom Körper aufgewärmte Grenzschicht der Luft und beschleunigt damit die Wärmeabgabe, solange ein Temperaturgefälle nach aussen besteht [Krueger, 1991].

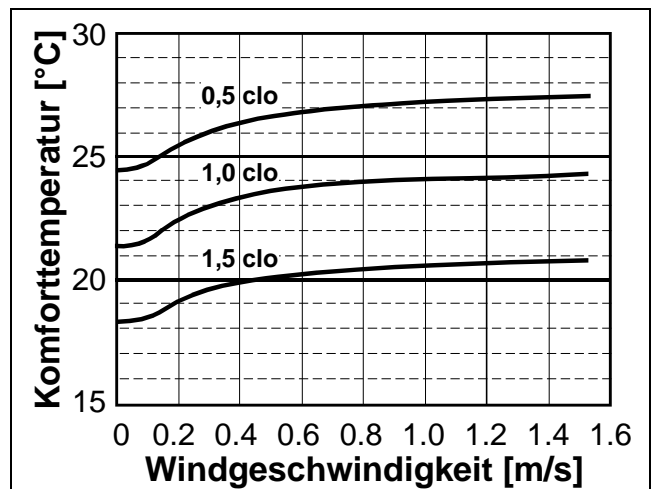


Fig. 2-10: Diagramm zur Bestimmung der Komforttemperatur bei gegebener Windgeschwindigkeit und Bekleidungsisolierung für Körperaktivitäten von 1.2 met.

Die Luftgeschwindigkeit sollte aber nirgends 0.5 m/s überschreiten. Luftgeschwindigkeiten unter 0.1 m/s wirken nicht als unangenehme Zugluft (siehe Fig. 2-11). Sie spielen für die Thermoregulation des menschlichen Körpers keine wesentliche Rolle mehr. Für den Zusammenhang zwischen Komforttemperatur und Luftbewegung siehe Fig. 2-10.

### 2.6.3.4. Relative Feuchte

Luft kann nicht beliebig viel Wasser aufnehmen. Wenn ein Sättigungsgrad von 100% erreicht ist,

beginnt es zu „regnen“. Die maximal mögliche absolute Menge ist von der Raumtemperatur abhängig. Die relative Feuchte gibt in Prozent den Grad der Sättigung an. Die relative Feuchte spielt daher für die Thermoregulation eine Rolle, wenn Körperwärme durch Verdunstung abgegeben werden muss (siehe Kap.2.5.3). Schwitzen ist deshalb um so wirksamer, je geringer die relative Feuchte der Umgebungsluft ist.

Für leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit in Innenräumen ist dies im allgemeinen nicht von Bedeutung. Es wird jedoch empfohlen, dass die relative Feuchte zwischen 30% und 70% gehalten wird. Die Grenzen sind gesetzt, um das Risiko von unangenehm nasser oder trockener Haut, Augenirritationen, statischer Elektrizität, mikrobiologischem Wachstum und Atemwegserkrankungen zu vermeiden.

## 2.7. Lokaler thermischer Komfort

Abgesehen vom globalen Ganzkörper-Komfort beeinflussen auch lokale thermische Irritationen das Wohlbefinden. Dies betrifft insbesondere die Zugluft (ungewollte lokale Kühlung) und Strahlungskühlung durch kalte Flächen wie Fenster im Winter. Im zweiten Fall wird die Asymmetrie der Strahlung am Körper als Beurteilungskriterium herangezogen. Auch das Gefälle der Raumtemperatur sollte begrenzt werden.

### 2.7.1. Zugluft

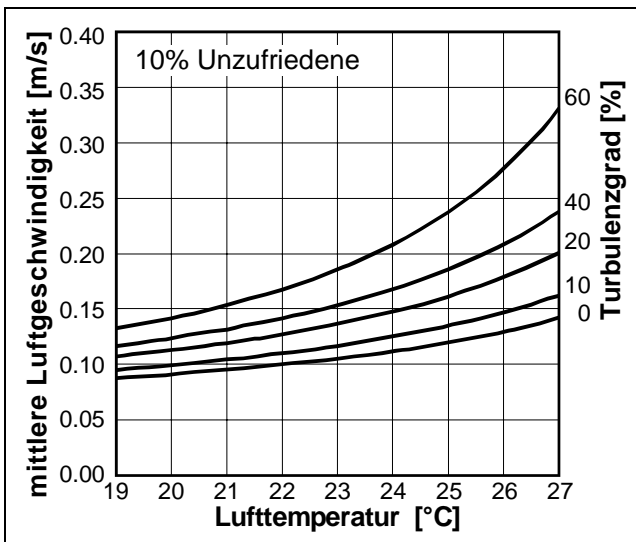


Fig. 2-11: Erlaubte mittlere Luftgeschwindigkeit als eine Funktion der Raumtemperatur und des Turbulenzgrades. Den Kurven liegt die Annahme von 10% unzufriedener Personen zugrunde. Sie sind anwendbar für leichte sitzende Tätigkeit (1.2 met).

Zugluft wirkt deshalb unangenehm, weil sie zu lokaler Kühlung am Körper führt. Der Kopf-Nacken-Bereich und der Bereich der Fussknöchel sind am empfindlichsten für Diskomfort

durch Zugluft. Die Arbeitsgruppe um Fanger hat das Problem der Zugluft mit 150 Personen untersucht und 1987 eine Formel zur Berechnung des Prozentsatzes durch Zugluft beeinträchtigter Personen veröffentlicht (vgl. ISO 7730). Einige Ergebnisse sind in Fig. 2-11 dargestellt.

Der Diskomfort durch Zugluft hängt ab von der Raumtemperatur, der lokalen mittleren Luftgeschwindigkeit und dem sogenannten lokalen Turbulenzgrad Tu. Dieser ist definiert als das Verhältnis der Standardabweichung der lokalen Luftgeschwindigkeit zu der lokalen mittleren Luftgeschwindigkeit mal 100%. Je tiefer der Turbulenzgrad ist, desto grösser kann die mittlere Luftgeschwindigkeit sein, da laminare Strömungen weniger kühlen als turbulente.

### 2.7.2. Asymmetrie der Strahlung

Zur Bewertung der Strahlungsasymmetrie für sitzende Tätigkeit bezieht man die Strahlungstemperatur auf eine kleine Fläche 0.6 m über dem Fussboden. Sie soll zwischen vertikalen Flächen (z.B. Fenster und gegenüberliegende Wand) weniger als 10°C betragen. Auch vertikale Temperaturgradienten z.B. von einer warmen (beheizten) Decke können zu Irritationen führen. Sie sollten weniger als 5°C betragen. Während der Heizperiode muss die Temperatur des Bodens in der Regel zwischen 19°C und 26°C liegen. Fussbodenheizungen dürfen für 29°C ausgelegt sein.

### 2.7.3. Gefälle der Raumtemperatur

Das höhenmässige Gefälle der Raumtemperatur zwischen 1.1 m und 0.1 m oberhalb des Fussbodens (= Kopf-Fusshöhe beim Sitzen) soll weniger als 3°C betragen.



## 2.8. Adaptive Komfortmodelle

Die fortschreitende Entwicklung immer ausgefilterter Klimamasse lässt vermuten, dass sie immer besser mit den Antworten von befragten Personen am Arbeitsplatz korrelieren. Dies ist aber nicht der Fall: Nur 20 bis 40% der Antwortvarianz kann auch mit den neusten physiologisch-physikalisch begründeten Komfortindikatoren erklärt werden [Auliciems et al., 1998] (siehe auch Fig. 2-12). In einigen Untersuchungen korreliert die einfache Raumtemperatur mit der Befindlichkeit sogar besser. Dies muss wohl dadurch erklärt werden, dass noch zusätzliche psychologische inter- und intraindividuell verschiedene Faktoren wie klimatische Verhaltensanpassung, Gewöhnung (Habituation) und Erwartung eine Rolle spielen. Neuere Modelle – sogenannte adaptive Modelle – versuchen diese Faktoren zusätzlich zu berücksichtigen.

### 2.8.1. Verhaltensanpassung

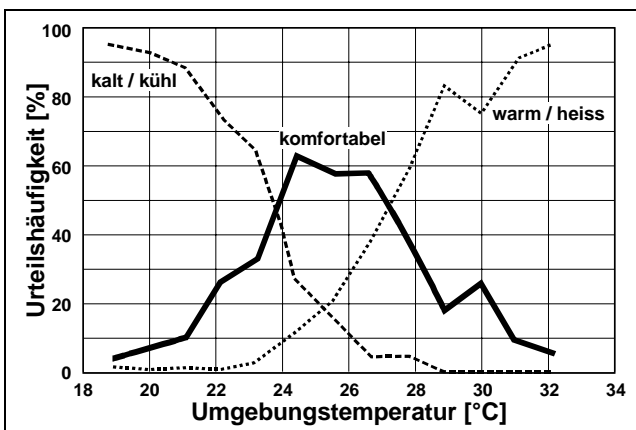


Fig. 2-12: Beurteilung verschiedener Raumtemperaturen durch Personen mit unterschiedlichen, individuellen Bedürfnissen (1296 mit 0,6 clo bekleidete Personen, sitzende Bürotätigkeit; rel. Feuchte: 50%, Windgeschwindigkeit: 0.1 m/s, Lufttemperatur = Strahlungstemperatur).

Die Thermoregulation des menschlichen Körpers kann nicht losgelöst vom Verhalten und der Raumklimatisierung gesehen werden (Fig. 2-13). Die physiologische (autonome) Regulation wird durch das Verhalten gestützt. Der frierende Mensch kann sich zusätzlich bewegen und damit Bewegungswärme erzeugen, er kann sich isolierender bekleiden oder auch einen lokalen Heizofen in Betrieb nehmen. Der schwitzende Mensch entledigt sich der Kleider und sucht gegen die Wärmestrahlung schattige Orte auf oder – zum Abtransport überschüssiger Wärme – Luftbewegung oder kühlendes Was-

ser. Ein lokaler Ventilator sorgt für zusätzliche Luftturbulenz.

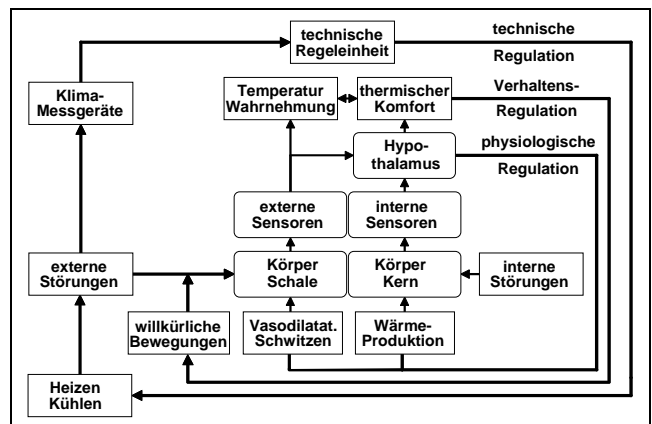


Fig. 2-13: Schematischer Aufbau der Thermoregulation auf technischer, Verhaltens- und physiologischer Ebene.

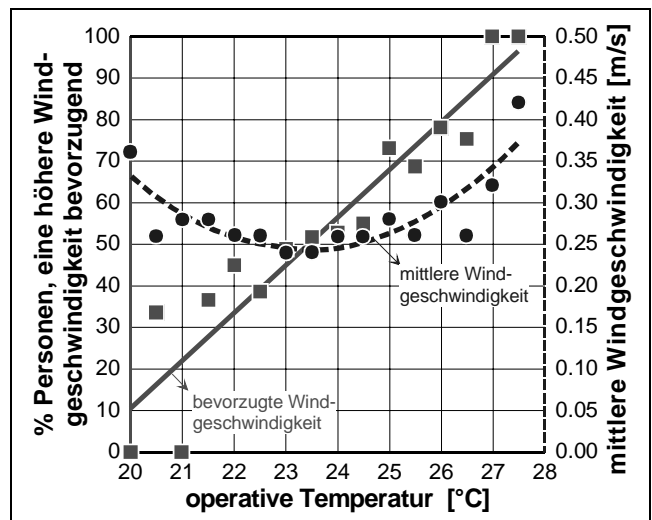


Fig. 2-14: Bevorzugte Luftbewegung in klimatisierten Gebäuden in den Tropen. Kreise kennzeichnen die erzeugte Windgeschwindigkeit (Skala rechts). Der Prozentsatz Personen, die eine höhere Windgeschwindigkeit bevorzugen, ist durch Quadrate dargestellt (Skala links) [Auliciems et al., 1998].

Die Klimaanlage beeinflusst über Lufttemperatur, Strahlung, Windgeschwindigkeit und relativer Feuchte die Thermoregulation. Die Vorgaben von Klimaanlage beruhen auf den physiologischen Klimamodellen und führen nicht immer zu optimalen Lösungen. So werden Luftströmungen <0.2 m/s vorgesehen, um das Risiko von Zugluft zu vermindern. Untersuchungen zeigten jedoch, dass Personen bereit sind, höhere Raumtemperaturen durch grössere Windgeschwindigkeit zu kompensieren und nicht notwendigerweise durch zusätzliche Küh-

lung (Fig. 2-14). Dieser Aspekt ist auch im Hinblick auf den Energieverbrauch von Klimaanlage von Bedeutung.

### 2.8.2. Habituation und Aussenklima

Nach Unterschieden in der thermischen Wahrnehmung von Personen unterschiedlicher Gruppen wird schon lange geforscht. So wird vermutet, dass Personen in heissen Klimata (z.B. in den Tropen oder im Sommer) besser an wärmere Umgebungen adaptiert sind und eher bevorzugen als an Kälte gewohnte Leute. Untersucht wurde die sogenannte Neutraltemperatur  $t_{\psi}$ , diejenige Temperatur, welche mit „neutral“- und „komfortabel“-Bewertungen korrespondiert. Sie entspricht etwa der bereits besprochenen Behaglichkeitstemperatur. Diese zeigte sich von der mittleren Aussentemperatur  $t_m$  und der mittleren, in der Gegend typischen Innentemperatur  $t_i$  wie folgt abhängig:

$$t_{\psi} = 0.48 \cdot t_i + 0.14 \cdot t_m + 9.22$$

Dieser Zusammenhang ergab sich als Zusammenfassung von Studien, die sowohl in klimatisierten wie unklimatisierten Räumen stattfanden. Es deutet vieles darauf hin, dass dieses Ergebnis nicht nur durch unterschiedliche Kleidungsgewohnheiten oder andere durch thermophysiologisch erfassbare Gründe zustande kommt.

### 2.8.3. Erwartetes Raumklima

Studien ergaben auch, dass Erwartungen an das Raumklima eine wesentliche Rolle bei der Beurteilung spielen. So wurde in klimatisierten Räumen eine viel grössere Empfindlichkeit für Abweichungen von der mittleren Temperatur nachgewiesen, als es gemäss dem PMV-Index zu erwarten gewesen wäre (Fig. 2-15). Personen erwarten von einer Klimaanlage, dass sie präzise arbeitet und sind gegenüber Abweichungen weniger tolerant.

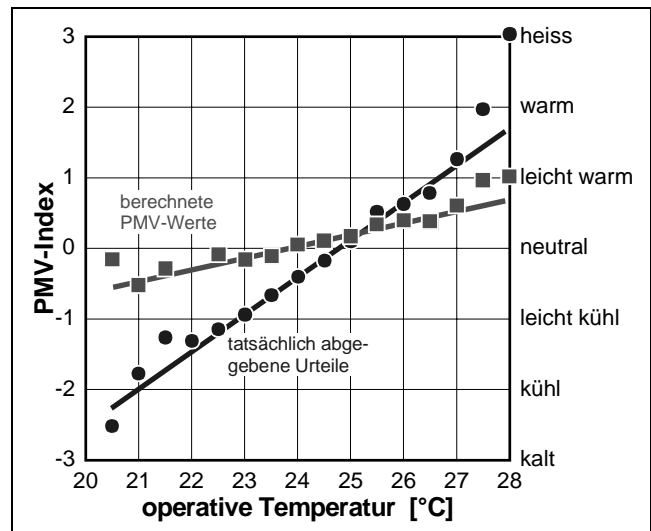


Fig. 2-15: Thermische Bewertung eines klimatisierten Raumes in den Tropen gemäss PMV-Index (Quadrate, Skala links) und von den Personen abgegebene Urteile (Kreise, Skala rechts) [Auliciems et al., 1998].

## 2.9. Literatur

- Schmidt R.F.: Neuro- und Sinnesphysiologie; Kap. 8.4, 8.5, 8.9.
- Schmidt & Thews: Physiologie des Menschen; Kap. 9.3, 9.4.
- Hensel H.: Cutaneous Thermoreceptors. Handbook of sensory Physiology. A. Iggo (Ed.) Springer, Berlin; Vol.2 Chap.3 (1973) P79-110.
- Eissing G. (Hrsg., 1986): Klima und Luft, Inst. für angewandte Arbeitswissenschaft IfaA; Wirtschaftsverlag Bachem, Köln.
- Wenzel H.G., Piekarski C. (1985): Klima und Arbeit. Bayerisches Staatsministerium für Arbeit und Sozialforschung. 4. Auflage, München.

### Zitierte Artikel:

- Auliciems A., de Dear R. (1998): Thermal Adaptation and Variable Indoor Climate Control. In: Auliciems A. (Ed.): Advances in Bioclimatology, Springer-Verlag Berlin V5, P61-86.
- DuBois D., DuBois E.F. (1916): A formula to estimate approximate surface area, if weight and height are known. Arch. Intern. Med. V17, P863-871.
- Fanger P.O. (1970): Conditions for thermal comfort. Introduction of a general comfort equation. First Internat. Symposium on temp. regulation; New-Haven (Aug. 19-23, 1968). Thomas: Springfield-III. P152-176.

- Gagge A.P. (1981): Rational Temperature Indices of Man's Thermal Environment. In: Cena K., Clark J.A. (Eds.): Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort. Elsevier, Amsterdam P79-98.
- Gagge A.P., Forbelets A., Berglund L.G. (1986): A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE Trans. V75, P108-125.
- Houghton F.C., Yaglou C.P. (1923): Determining lines of equal comfort. ASHVE Trans. V29:163-175, 361-379.
- Krueger H. (1991): Thermoregulation des Menschen. Warum Schweissperlen allein nicht kühlen. NZZ 26. Juni, P69.
- SUVA (1998): Medizinische Prophylaxe bei Untertage-Arbeiten im feucht-warmen Klima. Arbeitsmedizin Nr. 26, 2 Aufl., Bestell-Nr.: 2869/26.
- ISO 7243:1989: Warmes Umgebungsklima - Ermittlung der Wärmebelastung des arbeitenden Menschen mit dem WBGT-Index (wet bulb globe temperature).
- ISO 7730 :1994: Gemäßigtes Umgebungsklima - Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit.
- ISO 7933:1989: Warmes Umgebungsklima - Analytische Bestimmung und Beurteilung der Wärmebelastung durch Berechnung der erforderlichen Schweißrate (SN EN 12515).
- ISO 8996:1990: Ergonomie - Bestimmung der Wärmerezeugung im menschlichen Körper.

---

## 2.10. Fragen zur Thermorezeption

---

- 2-1 Beschreiben Sie den Unterschied zwischen den Wärmeübergangsformen "Konduktion", "Konvektion", "Temperaturstrahlung" und "Schweissverdunstung".
- 2-2 Beschreiben und erklären Sie die thermoregulatorischen Prozesse bei Fieberanstieg und Fieberabfall.
- 2-3 Beschreiben Sie die Grössen, die die Körpertemperatur beeinflussen.
- 2-4 Durch Habituation kann der Schweissprozess effektiver werden. Welche Bedeutung hat das für die Homöostase?
- 2-5 Formulieren Sie den Erhaltungssatz der Thermoregulation und beschreiben Sie die Prozesse, die der Homöostase dienen.
- 2-6 Welche Bedeutung hat die Temperaturstrahlung Sommers wie Winters für den thermischen Comfort (Thermoregulation)? Begründen Sie Ihre Aussage und zeigen Sie an Beispielen die Bedeutung auf.
- 2-7 Welche Aussage können Sie für die Schweissabgabe des ruhenden Menschen machen?
- 2-8 Stellen Sie in einer Graphik die Bedeutung von Strahlung, Konvektion und Schweissbildung bei verschiedenen Raumtemperaturen im Hinblick auf die Energiebilanz dar. Markieren Sie die Neutralzone.
- 2-9 Beschreiben Sie die Funktion des Kreislaufes im Hinblick auf die Thermoregulation.
- 2-10 Welche Thermoregulationsmechanismen kennen Sie? (Sie können als Wärmefluss in einer Gleichung dargestellt werden).
- 2-11 Wie erklären Sie, dass man in einem feuchteren Raum bei gleicher Temperatur durch Schweisssekretion mehr Wasser verliert?
- 2-12 Wie erklären Sie, dass man auf einem Gletscher, während einer Skitour bei Sonnenschein, auch in den Badehosen nicht friert, obwohl die Aussentemperatur kälter ist als die Körpertemperatur?
- 2-13 Wieso ist Schwitzen unwirksam, wenn der Schweiss perlt (tropft)?
- 2-14 Wie erklären Sie, dass Kälterezeptoren sich bei einer starken Temperaturschwankung (Beine kurz in die Badewanne eintauchen) wie Wärmerezeptoren verhalten?

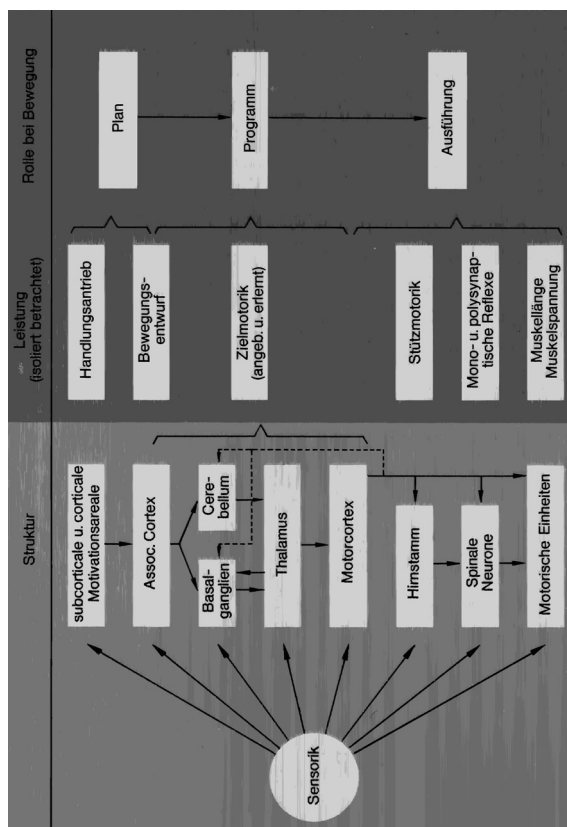
- 2-15 Welche vier Klimagrößen und welche zwei personenbezogenen Größen müssen zur Bewertung des Raumklimas hinsichtlich ihrer gemeinsamen Wirkung auf die Wärmebilanz des Menschen berücksichtigt werden?
- 2-16 Beschreiben Sie die Bedeutung zentraler und peripherer Thermorezeptoren für die Thermoregulation und den thermischen Comfort.

## 3. Sensomotorik

**Ziel:** Verständnis von Bewegungsabläufen und vor allem Bewegungsstrategien. Die erworbenen Kenntnisse sollen befähigen, die Bedeutung motorischen Lernens kritisch zu erkennen und z.B. Folgerungen für präventive Massnahmen zur Verhütung von muskuloskeletalen Beschwerden zu ziehen. Die Funktion eines einfachen Regelkreises und die Bedeutung des Efferenz-Reafferenz-Prinzips soll präsent sein. Letztlich soll die Frage diskutiert werden können, ob und warum es komfortable Körperhaltungen und Bewegungsabläufe gibt.

Hierzu werden einige Grundphänomene der Körpermotorik an praktischen Beispielen verdeutlicht. Funktionell anatomische und physiologische Grundlagen werden vermittelt und deren Bedeutung für die Körpermotorik diskutiert.

### 3.1. Überblick und Grundbegriffe



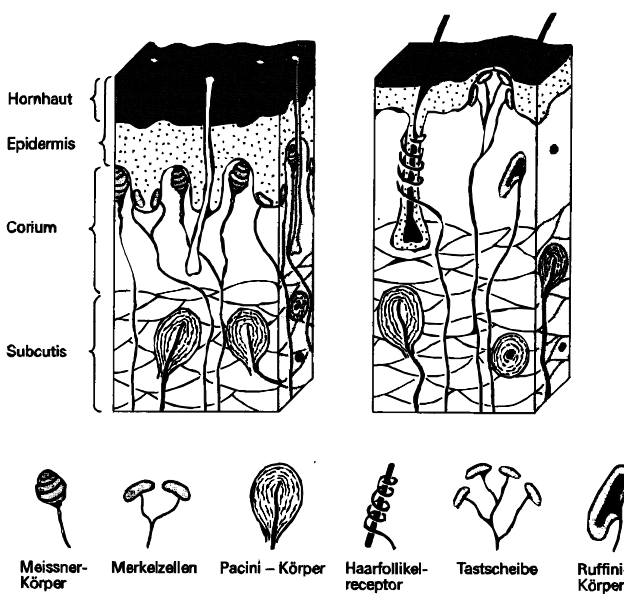
**Motorisches System im Überblick:** Die wichtigsten Strukturen und ihre Hauptverbindungen sind in der linken Säule angeordnet. Die mittlere Säule betont die bei isolierter Betrachtungsweise herausragenden Leistungen der einzelnen Abschnitte des motorischen Systems, die rechte gibt die Rolle bei der Initiierung und Durchführung einer Bewegung wieder. Es sei auf die parallele Position der Basalganglien und des Kleinhirns und die Einordnung des Motorcortex am Übergang zwischen Programm und Ausführung hingewiesen.

- **Feinabstufung der Muskelkraft:** Augenmuskulatur, Fingermuskulatur, Handmuskulatur, Unterarmmuskulatur, Oberarmmuskulatur. Hinweis auf die Bedeutung von motorischen Einheiten.
- **Spinalmotorik:** elementare Handlungs- und Bewegungsprogramme, Rückenmark.
- **Stützmotorik:** Kontrolle von Haltung und Stellung des Körpers im Raum; Hirnstamm.
- **Zielmotorik:** Handlungsantriebe, Bewegungsentwürfe, Bewegungsprogramme; subcorticale Motivationsareale, assoziativer Cortex, Basalganglien, Kleinhirn.
- **Eigenreflex:** Muskelreflex: z.B. Knie-"Sehnenreflex" mit Bahnung; Aufbau und Funktion von Reflexbögen auf spinaler Ebene mit antagonistischer Reaktion von Agonist und Antagonist.
- **Fremdreflex:** z.B. Fluchtreflex beim Forsche; Bedeutung für Bewegungsabläufe.
- **Integrative Mechanismen:** Bedeutung der motorischen Einheit und der Synthese von Bewegungselementen.
- **Koordinierung von Bewegungen:** Links-rechts: Fingersuch von Kelso, Parallelbewegung beider Finger mit zunehmender Frequenz führt von paralleler Bewegung zu Gegenbewegung, „um“ das Gleichgewicht zu halten. Untere-obere Extremität: Kreisen mit verschiedener Drehrichtung.

- **Strategien:** Bedeutung einfacher Rückkopplung beim Gehen: Treppenlaufen im Dunkeln. Beschleunigung von Bewegungen: Klavierspiel, Tischtennis. Motorisches Lernen: Ausführung von erlernten und ungelerten Bewegungen ohne visuelle Rückkopplung: Finger-Nase-Versuch.
- **Bewegungsökonomie:** Es gibt individuell optimierte Bewegungen, die aus einer Vielzahl möglicher Bewegungen ausgesucht werden: Aufheben eines Gegenstandes vom Pult.
- **Erkrankungen:** Querschnittslähmung (Areflexie, Flexorreflex, Extensorreflex), Asynergie (Auflösung der Gleichzeitigkeit von Bewegungen in ein Hintereinander), Tremor (Störung der Kursskorrektur), Parkinson-Syndrom ("Schüttellähmung"; Akinese, Rigor, Ruhetremor).

### 3.2. „Messfühler“

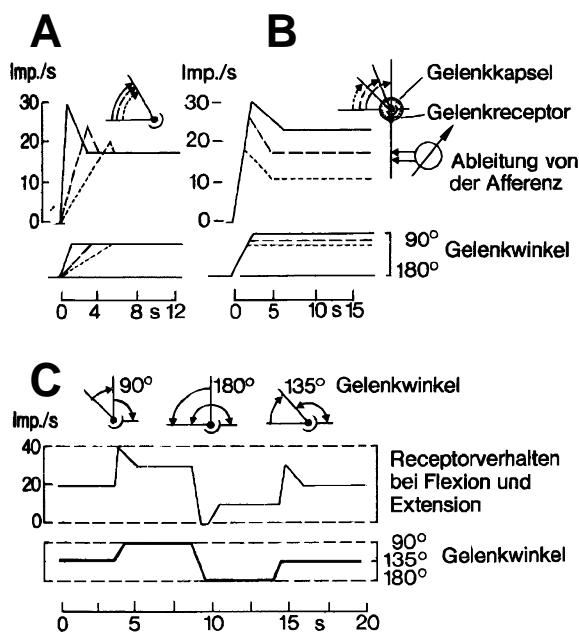
Neben dem Auge (visuelle Bewegungskontrolle ist langsam und genau) und dem Gleichgewichtsorgan (Labyrinth) sind folgende Rezeptoren bei der Koordination von Bewegungen und der Wahrnehmung der Körperhaltung beteiligt:



**Mechanorezeptoren der Haut:** Registrierung von Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung. Im Bild: Schematische Darstellung der Struktur und der Lage von Mechanorezeptoren in der unbehaarten und behaarten Haut.

**Sehnenrezeptoren:** Golgi-Sehnenorgan; Aktivität bei isotoner und isometrischer Kontraktion des Muskels → vorwiegend Messung der Muskelspannung; Schutz der Sehnen vor zu hoher Belastung.

**Muskelspindel:** Funktion bei isotoner und isometrischer Muskelfunktion → vorwiegend Messung der Muskellänge.



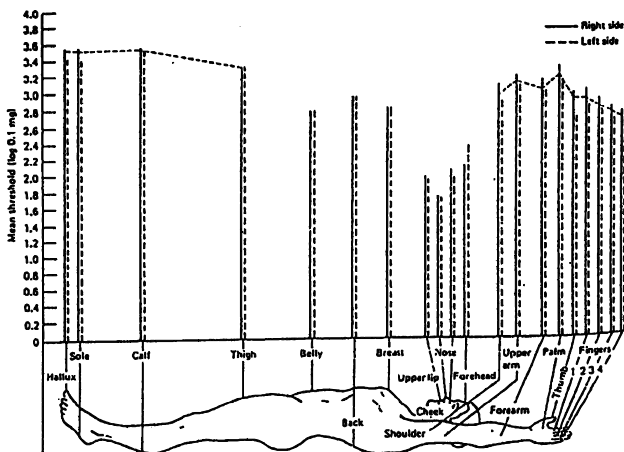
**Gelenkrezeptoren:** Örtliche Dispersion durch Messung des gesamten Winkelbereiches eines Gelenkes mit verschiedenen Rezeptoren, die nur einzelne Winkelbereiche messen.

(A) Änderungen der Gelenkstellung um einen festen Betrag mit drei verschiedenen Einstellgeschwindigkeiten.

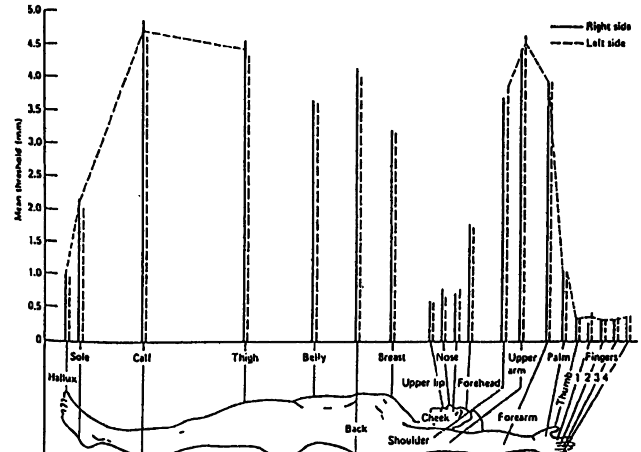
(B) Änderung der Gelenkstellung aus einer Ausgangsposition zu drei verschiedenen Endpositionen. Konstante Einstellgeschwindigkeit.

(C) Verhalten eines Rezeptors beim Hin- und Herbewegen eines Gelenkes. Dieser Rezeptor reagiert auf Flexion mit einer Zunahme der Entladungsrates. Andere zeigen ein spiegelbildliches Verhalten (schematisch, in Anlehnung an Boyd und Roberts).

### 3.3. Psychometrie



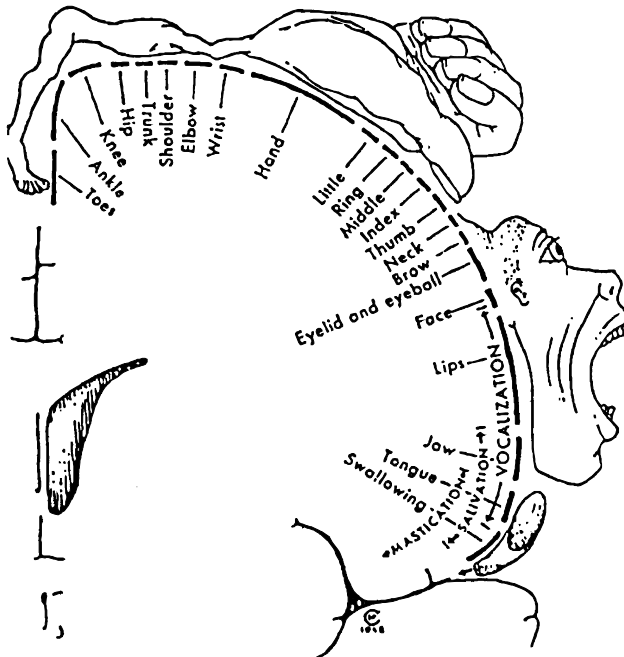
Druckempfindungsschwellen von Männern (nach S. Weinstein, 1968).



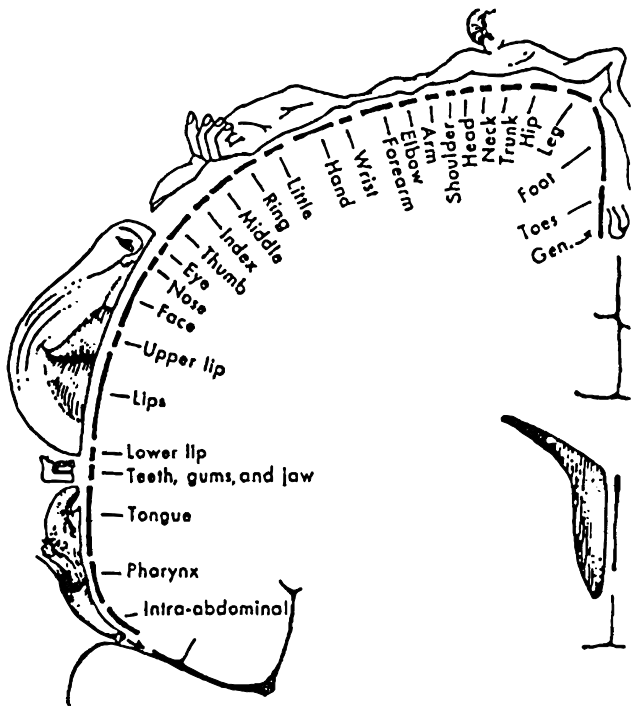
Zweipunktauflösungsschwellen von Männern (nach S. Weinstein, 1968).

### 3.4. Cortex-ZNS (funktionelle Anatomie)

Das Kleinhirn ist zuständig für die Steuerung und Korrektur von Haltung und Bewegung, für die Kurskorrektur langsamer Zielmotorik und für die Koordination mit der Stützmotorik, sowie die reibungslose Durchführung der im Cortex entworfenen schnellen Zielmotorik.



Motorische corticale Projektionsareale: Räumliche Zuordnung zwischen Körperperipherie und motorischem Cortex. Das wichtigste corticale motorische Areal des Menschen ist der Gyrus praecentralis. Es fällt sofort auf, dass diejenigen Körperstellen, die über besonders gute motorische Fähigkeiten verfügen, wie zum Beispiel Finger, Lippen, Zunge überproportionale Anteile des Gyrus praecentralis einnehmen, während Rumpf und proximale Extremitäten nur auf relativ kleinen Anteilen repräsentiert sind (nach Penfield und Rasmussen, 1950)



**Sensorische corticale Projektionsareale:** Zuordnung von Arealen der Körperoberfläche zu Feldern der Grosshirnrinde. Querschnitt durch das linke Grosshirn im Bereich des Gyrus postcentralis. Eingezeichnet sind die korrespondierenden Areale der rechten Körperhälfte. Die Zuordnung zwischen Körperoberfläche und somatosensorischem Cortex wurde bei wachen Patienten mit lokaler elektrischer Hirnreizung ermittelt (nach Penfield und Rasmussen, 1950)

### 3.5. Organisation von Bewegungen

	Gesamt-Bewegungszeit		Ziel links	Startpunkt	Ziel rechts	Bewegungs-Gesamtzeit		
	[ms]	[ms]				[ms]	[ms]	
Ia				s	s	159	377	Ia
Ib	371	151	●	s	s			Ib
II	403	166	●	s	s	169	409	II
III				s	s	78	296	III
IV	287	82	●	s	s			IV
Va	393	155	●	s	s	133	379	Va
Vb	383	140	●	s	s	158	398	Vb

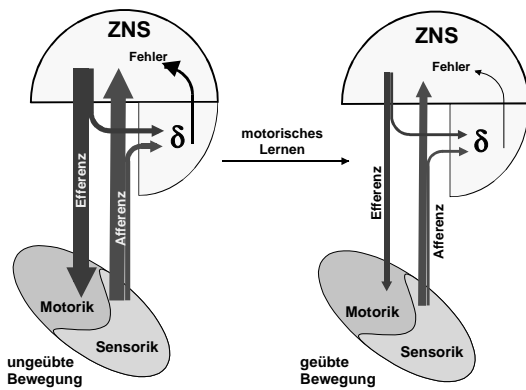
**Koordinieren von Bewegungen:** Ausführungszeit (Gesamtzeit) und Bewegungszeit für einhändige und beidhändige Positionierungsaufgaben mit unterschiedlicher Zielweite und Zielgenauigkeit. Wenn wir aus der Mitte heraus den linken Finger nach links und den rechten Finger nach rechts bewegen, die Endpunkte aber unterschiedlich entfernt von der Mitte liegen bzw. die Endposition unterschiedlich genau angesteuert werden müssen, bestimmt jeweils der aufwendigste Prozess (der weitere bzw. genauere) den Ablauf der Bewegung. In der Abbildung sind sieben solche Bewegungen und der Zeitbedarf zusammengestellt.

$$T_{pos} = K_m + I_m \cdot \log\left(\frac{2 \cdot A}{W}\right)$$

- A: Distanz zum Ziel (Endposition – Startposition)
- W: Grösse des Zielgebiets, bestimmt die Positioniergenauigkeit.
- I<sub>m</sub>: Informationsverarbeitungskapazität (> 0,1 sec.)
- T<sub>pos</sub>: Positionierzeit
- K<sub>m</sub>: Verzögerungskonstante, abhängig vom bewegten Körperteil (für die Hand ist K<sub>m</sub> = 0,177 sec).

**Gesetz von Fitts:** Fitts (1954) fand heraus, dass sobald eine Bewegung gestartet ist, die benötigte Positionierzeit (T<sub>pos</sub>) im voraus berechnet werden kann. Mit T<sub>pos</sub> ist die Gesamtzeit, bis zur Positionierung einer zielgerichteten Bewegung eines Körperteils gemeint. Sie hängt u.a. ab von der Distanz (A) bis zum Ziel und der Grösse (W) des Zielgebiets.

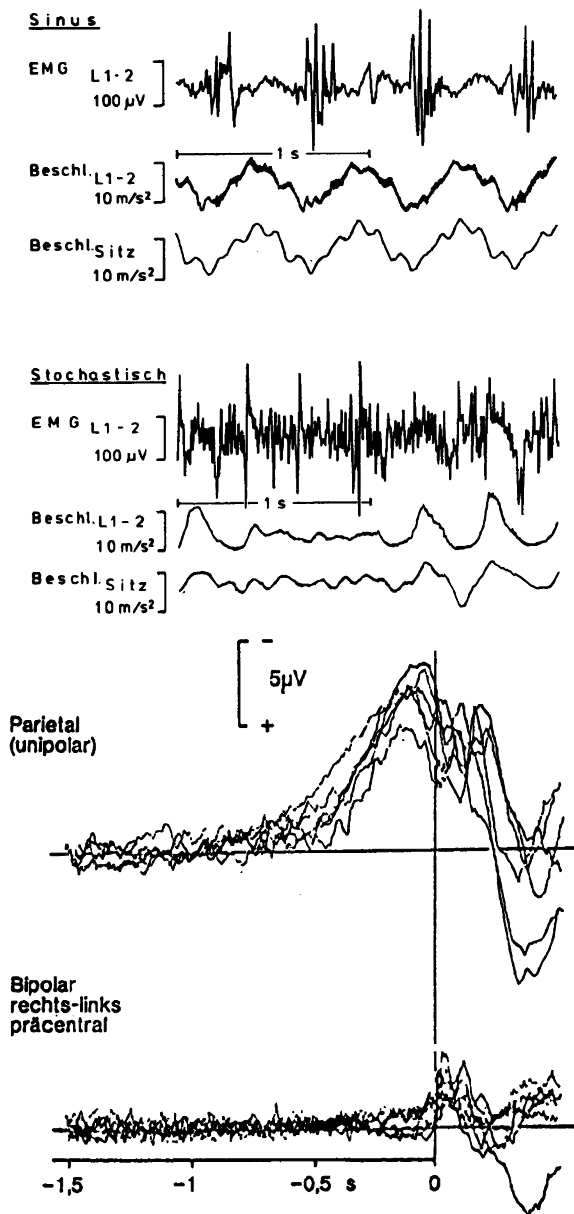




Regelsystem der Körpermotorik und Lernen: Eine Kopie von Efferenz (zeitliches und räumliches Muster des Bewegungsablaufs) und Affferenz (zeitliches und räumliches Muster der sensorischen Rückmeldung) werden miteinander verglichen und daraus ein Fehlersignal für die Verbesserung des Bewegungsablaufs (Efferenz) berechnet (Afferenz-Reafferenz-Prinzip von v.Holst). Mit Übung (rechts) werden die motorischen Muster ökonomischer und schneller. Die Bedeutung der Rückkopplung sinkt.

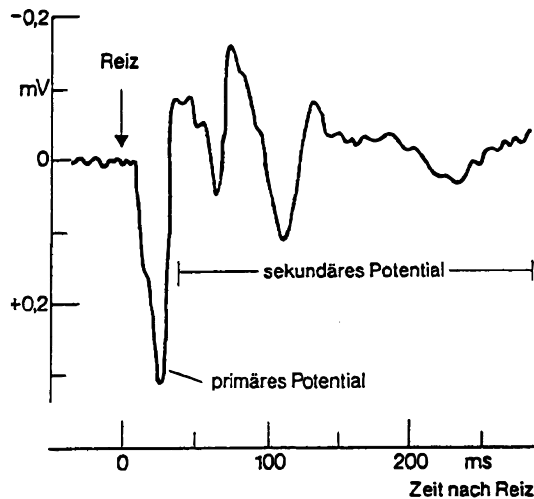
### 3.6. Methodik

Neben der Bewegungsaufzeichnung mit optischen oder ultraschalltechnischen Methoden werden hauptsächlich Messungen von elektrischen Aktivitäten des Körpers durchgeführt.



Elektromyographie (EMG): Die Elektromyographie ist die Aufzeichnung der elektrischen Aktivität des Skelettmuskels. Das Prinzip der Messung ist dasselbe wie beim Elektrokardiogramm (EKG). Mit zwei Elektroden, die man über dem zu untersuchenden Muskel der Haut anlegt oder in den Muskel einsticht, werden elektrische Potentialdifferenzen registriert. Man gewinnt ein Bild über die Summenaktivität des ganzen Muskels, oder - bei Verwendung feiner Nadelelektroden - auch einzelner motorischer Einheiten. Mit EMG-Mapping werden Muskelgruppen bzw. mehrere motorische Einheiten differenziert erfasst. Im Bild: EMG des M. erector spinae am sitzenden Menschen unter Einfluss von Sinusschwingungen (oben) und stochastischen Schwingungen (unten) in horizontaler Richtung x (nach Dupuis et al., 1972).

Elektroenzephalogramm (EEG): Hirnpotentiale, abgeleitet von der Kopfhaut, vor willkürlichen raschen Beugebewegungen des rechten Zeigefingers (Bereitschaftspotential). Die Potentiale wurden durch Rückwärtsanalyse zahlreicher, auf Magnetband festgehaltener Einzelmessungen erhalten. Acht Experimente an verschiedenen Tagen mit derselben Versuchsperson, je 1000 Bewegungen pro Experiment. Oben: unipolare Ableitung der Scheitelregion gegen beide Ohren als Referenz. Unten: bipolare Ableitung linke gegen rechte präzentrale Handregion des motorischen Cortex. Das Bereitschaftspotential beginnt etwa 0,8 s vor Bewegungsbeginn. Die prämotorische Positivierung beginnt etwa 90 ms vor Bewegungsbeginn. Das Motorpotential erscheint nur in der bipolaren Ableitung und beginnt 50 ms vor Bewegungsbeginn im EMG.



**Somatosensorisch evoziertes Potential (EP):** Im Gegensatz zum EEG, das die Eigenaktivität des Gehirns bei möglichst guter Abschirmung von äusseren Reizen erfasst, sind evozierte Potentiale solche Ereignisse, die man als Antwort auf einen Reiz messen kann. Die Ableittechnik ist im Prinzip die gleiche wie beim EEG. Zur Abgrenzung der evozierten Potentiale gegenüber dem Ruhe-EEG misst man in der Regel mehrere gleichartige Reaktionen und mittelt die Messwerte, wobei sich die vom Reiz unabhängigen EEG-Wellen gegenseitig aufheben. Für alle Arten von Sinnesreizen kann man über den zugehörigen primären Rindenfeldern evozierte Potentiale messen. Im Bild: Elektronisch gemittelter Potentialverlauf nach lokaler elektrischer Hautreizung.

### 3.7. Literatur

- Schmidt & Thews: Physiologie des Menschen; Kap. 5, 9.1, 9.2., 9.6, 12.
- Schmidt: Neuro- und Sinnesphysiologie; Kap. 5., 8.1-8.3, 12
- E. v. Holst, H. Mittelstaedt: Das Reafferenzprinzip. Naturwissenschaften 37, 464-476 (1950).

### 3.8. Fragen zur Sensomotorik

- 3-1 Erklären Sie den Unterschied zwischen Afferenz und Efferenz. Was ist das Afferenz-Reafferenz-Prinzip von Holst? (Regelsystem der Körpermotorik im Kleinhirn).
- 3-2 Falls man die Hand auf dem Tisch liegen lässt, verschwindet nach einiger Zeit der Sinnesindruck "Oberflächenstruktur". Sobald wir die Hand bewegen, kommt die Information über die Rauheit der Oberfläche wieder zur Geltung. Auf welchen Mechanismus ist dies zurückzuführen? Welche Tastrezeptoren kennen Sie?
- 3-3 Für das Abrollen des Fusses ist eine Rückkopplung nötig. Für eine 1,8 m grosse Person erhalten wir vom Fuss zum Gehirn und zurück eine Leitungslänge von etwa 3 m. Falls man eine Leitungsgeschwindigkeit von 100 m/s annimmt, beträgt die Latenzzeit entsprechend 30 ms. Damit würden wir beim Laufen in Schwierigkeiten geraten. Wie ist es trotzdem möglich ist, solch komplexe Bewegungen durchzuführen?
- 3-4 Was ist eine "motorische Einheit"? Welche Bedeutung hat Sie für die Fähigkeiten eines Muskels?
- 3-5 Welche Prinzipien gibt es für eine abgestufte, kontinuierliche Bewegung?
- 3-6 Was ist unter "örtlichem Auflösungsvermögen bezüglich des Tastsinns" gemeint? Wie sieht die Verteilung des örtlichen Auflösungsvermögens auf der Körperoberfläche des Menschen aus? Welchen Zusammenhang sehen Sie dabei in bezug zur Motorik?
- 3-7 Wie erklären Sie, dass die Reproduzierbarkeit einer Winkeleinstellung des Handgelenkes bis zu einem Grad genau ist, obwohl Gelenkrezeptoren für einen Bereich von 5° verantwortlich sind?
- 3-8 Welche Bedeutung hat die Kenntnis der Grösse von motorischen Einheiten für die Arbeitsplatzgestaltung?

- 3-9 Wir können Bewegungen prospektiv durchführen. Dies ermöglicht uns das Überspielen von Rückkopplungsmechanismen. Erklären Sie diese Gedanken anhand eines Beispiels (Hinweis: Treppenhinunterlaufen, wobei man gesehen hat, dass nur noch drei Stufen fehlen).
- 3-10 Welche hemmenden Schaltkreise (in Neuronenschaltungen) kennen Sie? Erklären Sie die Vorteile der reziproken antagonistischen Hemmung bei der Koordination der Motorik.
- 3-11 Warum wird zur Berechnung der Positionierzeit einer zielgerichteten Bewegung mit dem Gesetz von Fitts die Grösse des Zielgebiets benötigt?
- 3-12 Zeichnen Sie den muskulären Reflexbogen (Eigenreflex/Fremdreflex) und erklären Sie die Bedeutung von Muskelspindel und  $\gamma$ -Motoneuron.

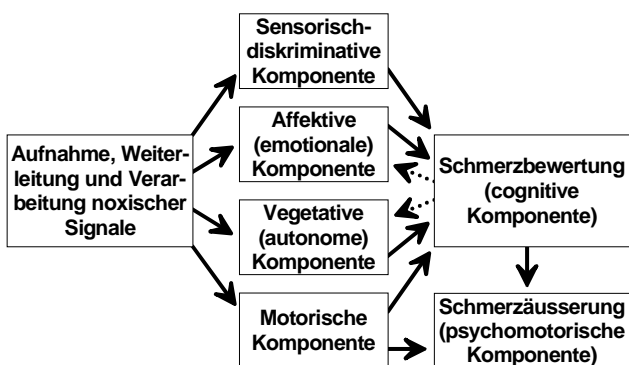
## 4. Schmerz

**Ziel:** Verständnis des Unterschiedes von Schmerzwahrnehmung und subjektiver Schmerzbewertung; subjektiver Umgang mit dem Phänomen Schmerz; Bedeutung von Tagebüchern für die Erfassung von sensorischen Wahrnehmungen und deren Beurteilung

### 4.1. Schmerzerfahrungen

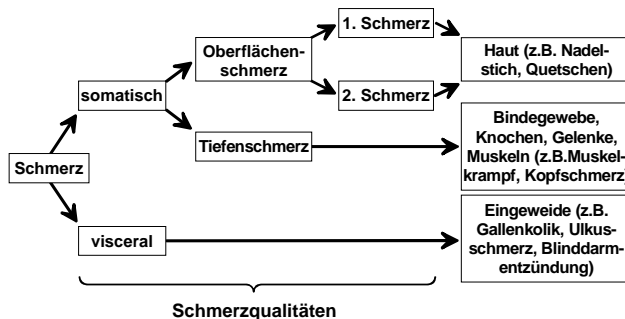
Wie folgende Zitate vermuten lassen, hat der Schmerz gegenüber anderen Sinnesreizen eine herausragende Bedeutung: „Wer nicht hören will, muss fühlen“; oder: „Krankheit ist der Arzt auf den wir am meisten hören. Der Güte und dem Wissen machen wir nur Versprechungen - dem Schmerz gehorchen wird“ (Proust). Folgende Aspekte kennzeichnen die Schmerzerfahrung:

- **Wahrnehmung:** kurzzeitig; Ablauf des akuten Schmerzes: Anfangs hell lokalisiert, dann dumpf schlecht lokalisierbar
- **Verhalten:** langfristig; Phasen der Reaktion auf eine Verletzung sind:
  1. Phase: Schmerzlosigkeit, wenn Heil in der Flucht zu suchen, Gegenteil Zahnarzt
  2. Phase: Schmerz (Wehtun), spiegelt mehr den inneren als den äusseren Zustand des Patienten wieder, der Schmerz kommt und geht. Erregung, Unruhe und Aggressivität legen eine irrationale Fortführung der Kampf- und Fluchtphase nahe. Suche nach Therapie.
  3. Phase: chronischer Schmerz, oft wird Suche nach Behandlung zur Hauptbeschäftigung mit Zeichen zunehmender Depression, Aufmerksamkeit für die Aussenwelt eingeschränkt; Appetitverlust, Libidoverlust, Verstopfung, Menstruationsstörungen, Beziehungsstörungen, Schlafstörung; Schmerz ist nach allgemeiner Sicht ein geistiger Vorgang mit einem körperlichen Prozess und beschädigtem Gewebe. Es fehlt dem Patienten von aussen gesehen aber nichts. Verstärker: Versicherungsleistung
- **psychologisch:** keine eindeutige Beziehung zwischen Reiz und Schmerzwahrnehmung sowie Schmerzempfinden z.B. Kriegsverletzung; schmerzloser Schmerz)
- **Kultur**
- **Geschlecht**



Schematische Darstellung der durch noxische Signale aktivierten Komponenten des Schmerzes. In die resultierende Schmerzbewertung (cognitive Komponente) und Schmerzäusserung (psychomotorische Komponente) gehen die sensorischen, affektiven und vegetativen Komponenten je nach Art des Schmerzes in unterschiedlichem Ausmass ein. Umgekehrt beeinflusst die Schmerzbewertung ihrerseits die Ausprägung der affektiven und vegetativen Schmerzkompnenten (gepunktete Pfeile). Das Schema gilt auch für Schmerzen, die nicht durch Nociceptoren oder neuralgische Erregungen bedingt sind (nach R.F. Schmidt).

## 4.2. Schmerzcharakterisierung



- Schmerzqualitäten: brennend, stechend, ziehend, prickelnd, scharf, dumpf
- somatischer Schmerz: Oberflächenschmerz und Tiefenschmerz, gut lokalisierbar;
  1. Schmerz von hellem Charakter und mit einer Latenz (1-2s)
  2. Schmerz mit dumpfem Charakter (schwerer lokalisierbar und nur langsam abklingend), löst primär Fluchreflex aus.Tiefenschmerz (z.B. Kopfschmerz) von dumpfem Charakter, schlechter lokalisierbar neigt zur Ausstrahlung, mit starkem Krankheitsgefühl verbunden)
- visceraler Schmerz: Eingeweideschmerz
- projizierter Schmerz: z.B. Bandscheibe
- übertragener Schmerz: Herz - linke Arminnenseite; Hyperpathie der Haut im zugehörigen Dermatome

## 4.3. Schmerztheorie

- Physiologie der Schmerzrezeptoren: mechanosensible, thermosensible, chemosensible und multimodale Nociceptoren sowie freie Nervenendigungen
- Mustertheorie: Pattern
- Schmerzverarbeitung bei Erkrankungen der ventralen Thalamuskern
- Gate-Control-Theorie
- Endorphine: Es gibt im ZNS Opiatrezeptoren, Hughes et al. (1975) identifizierten erstmals zugehörige Enkephaline, heute sind mehrere Familien von Endomorphinen bekannt; Substanzen finden sich vorwiegend im Hirnstamm, im Zwischenhirn, in der Hypophyse
- Stressanalgesie: Aufhebung der Schmerz Wahrnehmung bei Stress

## 4.4. Schmerztherapie

- Schmerzmittel: periphere Schmerzmittel; zentrale Schmerzmittel: Problem von Abhängigkeit und Sucht
- Neurochirurgie
- Coping: Biofeedback
- alternative Methode: Akupunktur, Aufhebung der Wirkung durch Naloxon spricht für Wirkung von Endomorphinen

---

## 4.5. Schmerzmessung

---

- psychophysische Messung: die Methode versagt, wenn es sich um klinischen Schmerz handelt, da dann keine Schwellwertbestimmung möglich ist. Messung therapeutischer Massnahmen muss mit Placebo, doppelblind erfolgen.
- direkte Messung: Verhalten wie z.B. Klagen, Jammern, Unruhe. Tagebuch; McGill-Fragebogen von Melzack
- operationale Messung: Herzfrequenz, Atemfrequenz, galvanischer Hautwiderstand, Muskelspannung, Pupille, evoziertes Potential

---

## 4.6. Literatur

---

- Schmidt R.F.: Neuro- und Sinnesphysiologie; Kap. 9 (Kap. 8).
- Schmidt & Thews: Physiologie des Menschen; Kap. 10 (Kap. 9).
- Keeser W., Pöppel E., Mitterhusen P. (ed.): Fortschritte der klinischen Psychologie Bd. 27; Schmerz, Urban&Schwarzenberg, München et al. 1982

---

## 4.7. Fragen zum Schmerz

---

- 4-1 Bei einem Menschen wird nach einer Armverletzung festgestellt, dass sich im Bereich der Hand im Vergleich zu normalen Bedingungen Schmerz nur noch schwer auslösen lässt. Bezeichnet man dies als "Analgesie", "Anästhesie", "Hyperalgesie", "Hypalgesie" oder als "Adaptation"?
- 4-2 Erklären Sie die Begriffe "Tiefenschmerz", "chronischer Schmerz" und "visceraler Schmerz". Geben Sie Beispiele.
- 4-3 Welche Symptome gelten bei länger dauernder Kompression einer Nervenwurzel (z.B. bei Bandscheibenschäden) als typisch?
- 4-4 Wie planen Sie eine Fragebogenaktion, die das Phänomen Schmerz erfassen soll?
- 4-5 Was ist ein "Dermatom" und was ist ein "übertragener Schmerz"?
- 4-6 Warum ist die Messung der subjektiven Schmerzintensität schwieriger als die der meisten anderen Wahrnehmungsintensitäten?

## 5. Geruch und Geschmack

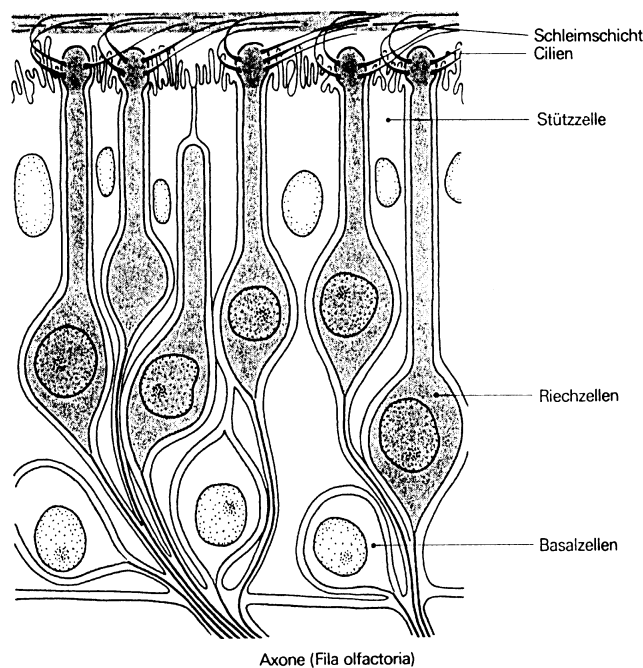
Referent: Markus Hangartner

### 5.1. Einleitung

Folgende Aspekte spielen für die Physiologie und Wahrnehmung von Geruch und Geschmack eine wesentliche Rolle:

- Bedeutung für Fortpflanzung, Markierung, Ernährung, Orientierung, Warnung.
- Interaktion zwischen Geruch und Geschmack
- Morphologie
- chemische Struktur
- quantitative Leistungen beobachtet anhand von: Schwellen, Intensität, Adaptation, Kreuzadaptation, Mischungen
- Wahrnehmungs-Empfindungsebene: Es findet eine Beschreibung nach Art des Geruchs bzw. Geschmacks und nach der Ausprägung angenehm ↔ unangenehm statt.
- sinnliche Erfahrungen

### 5.2. Geruch: Rezeptormodelle

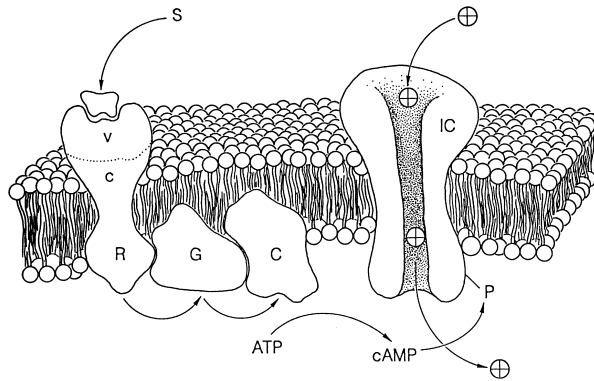


Die *Sinneszellen*: Die Zellkörper der spindelförmigen (primären) Sinneszellen sind ca. 10  $\mu$  lang, proximal und distal sehr schlank und in der Kernregion etwas erweitert. Das distale Ende der Zelle bildet einen *Sinneskolben*, der frei über das Epithel in den Schleim ragt. Von diesem Kolben stehen feine Härchen, die *olfaktorischen Zilien* nach allen Seiten in den Schleim. Ihre Zahl und ihre Länge sind je nach Tierart verschieden; beim Hund findet man pro Sinneszelle etwa 100 Zilien von 10  $\mu$  Länge und basal 1  $\mu$  Durchmesser.

*Stütz und Basalzellen* umgeben die Sinneszellen vollständig bis zu den Sinneskolben. Die distale Membran der Stützzellen ist zu Büscheln von *Mikrovilli* (bis zu 1000 pro Zelle) von 0,2-2  $\mu$  Durchmesser aufgefaltet. Genauere Untersuchungen am Riechepithel von Fröschen haben gezeigt, dass zwischen Stütz- und Sinneszellen besonders enge morphologische Beziehungen bestehen. Der Abstand zwischen beiden Zellen beträgt an einigen Stellen weniger als 80 Å; wahrscheinlich sind hier die Aussenlamellen beider Zellmembranen verschmolzen. Möglicherweise übernehmen die Stützzellen eine wichtige Funktion im Stoffwechsel der Sinneszellen; ausserdem sollen sie auch sekretorisch tätig sein. Die *Basalzellen* umhüllen die Axone der Sinneszellen und stehen im Kontakt mit den Schwannzellen um die Axonbündel des Riechnerven.

*Schleimschicht*: Die Oberfläche des Riechepithels ist mit einer Schleimschicht von 10-60  $\mu$  Dicke bedeckt. Es ist noch unklar, ob die Hauptmenge des Schleims von den *Bowman'schen Drüsen* unterhalb der Basalmembran oder von den *Stützstellen* sezerniert wird. Die chemische Natur und die physiologische Bedeutung des Schleims sind weitgehend unbekannt. Es ist anzunehmen, dass er als *Diffusionsbarriere* für den Reiz eine wichtige Rolle spielt: Wesentliche Parameter, wie z.B. die Geschwindigkeit der Einstellung einer maximalen Duftkonzentration an den Riechzellen, sind von

der Löslichkeit der gasförmig ankommenden Geruchstoffe im Schleim abhängig. Der Schleim ist, zumindest in seiner äussersten Schicht, in dauernder Bewegung; beim Menschen findet ein permanenter Transport von ca. 10 mm/min in Richtung Pharynx statt.

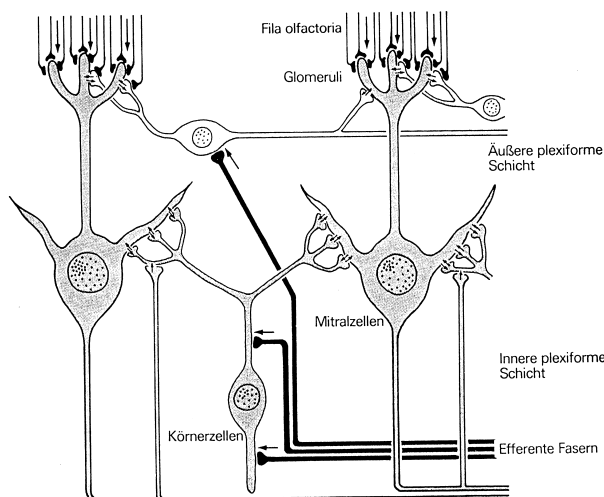


S:	Stimulus (Riechstoff)	ATP:	Adenosin-5'-triphosphat
R:	Rezeptorprotein mit variabler v und konstantem c Molekülteil	cAMP:	cyclisches Adenosin-3',5'-monophosphat
G:	Guanidin-triphosphat GTP	P:	Proteinkinase
C:	Adenylatcyclase	IC:	Ionenkanal

Aus Untersuchungen über den anatomischen Bau und molekulare Zusammensetzung der Cilien sowie Ergebnissen ihrer biochemischen Aktivitäten häufen sich die Anzeichen, dass dort die Reizauslösung an integralen Glykoproteinen vom Typ gp 95 der olfaktorischen Membran stattfindet. Die variable Molekülregion v des Rezeptormoleküls R, welche eine Vielzahl aktiver Stellen besitzen kann, geht eine spezifi-

sche, vermutlich nicht kovalente Bindung mit dem Stimulus ein. Der reversible Komplex durch *van-der-Waalsche* Kräfte, *Coulombsche* Anziehung oder Wasserstoff-Brücken gehalten, bewirkt eine allosterische Änderung der Quaternärstruktur von R, wodurch das GPT-Bindungsprotein G aktiviert wird (1. Messenger) und eine Kaskade von Enzymreaktionen auslöst. cAMP, durch Adenylatcyclase C aktiviert, spielt dabei die Rolle eines 2. Messengers, indem es das Kanalprotein P durch Phosphorylierung zum Öffnen anregt. Eine direkte Öffnung des Ionenkanals dagegen erscheint unwahrscheinlich. Die Depolarisation der olfaktorischen Membran ist mit einem raschen Ionenaustausch verbunden. Beim Ablauf einer einzigen Enzymkaskade können Tausende von Ionenkanälen geöffnet werden, was zu einer Signalverstärkung führt. Dieser Prozess erklärt die oft ausserordentlich niedrigen Schwellenwerte von Riechstoffen. Beim verwandten Sehvorgang z.B. werden durch ein aktiviertes Rezeptormolekül  $10^5$  sekundäre Messengermoleküle beeinflusst. Die Diskriminierung einer unbeschränkten Zahl von Geruchstoffen drängt einen mechanistischen Vergleich zum Erkennen von Antigenen durch das Immunsystem auf. Antikörper sind spezifische Rezeptoren, die Haptene auf ähnliche Weise signalisieren, wie "Odogene" sprich Riechstoffe durch "Odokörper".

### 5.3. Geruch: Neurophysiologie



**Zentrale Verbindungen:** Die Axone der olfaktorischen Rezeptorzellen ziehen in Bündeln (*Fila olfactoria*) durch das Siebbein zum *Bulbus olfactorius* derselben Hirnhemisphäre. Dort treffen sie in kugelförmigen Kontaktzonen, den *Glo-*

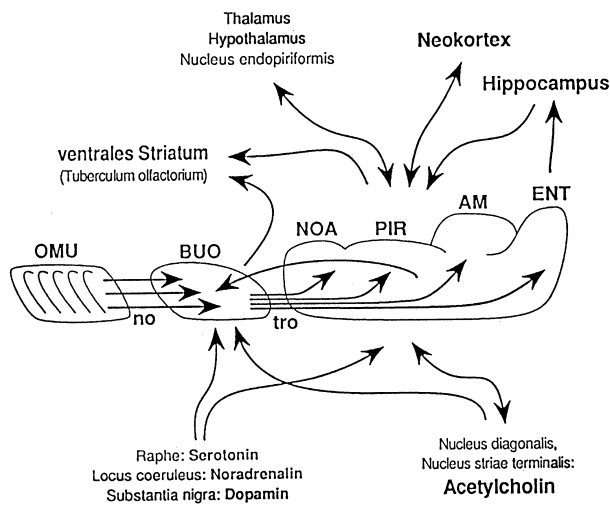
*meruli*, auf die Dendriten der - auffällig grossen - Mitralzellen. Hierbei kommt es zu einer deutlichen Reduktion der Duftinformationskanäle: etwa 1000 afferente Fasern, die jeweils eine Riechzelle repräsentieren, konvergieren auf eine einzige Mitralzelle. Die (schematisch angelegte) Abbildung zeigt ausserdem, dass die zellulären Elemente des *Bulbus* in Schichten angeordnet sind: Auf die Schicht der Glomeruli folgen die äussere plexiforme Schicht, die Schicht der Mitralzellen und schliesslich die Schicht der Körnerzellen. Alle Befunde sprechen dafür, dass hauptsächlich hier, im *Bulbus olfactorius* - der übrigens eine gewisse funktionale Ähnlichkeit mit der Netzhaut erkennen lässt - die durch Duftreize ausgelösten Impulsmuster der Rezeptorzellen verarbeitet, analysiert und möglicherweise auch schon "entschlüsselt" werden, während die eigentlichen Riechempfindungen wahrscheinlich erst in höheren (kortikalen) Hirnzentren entstehen. Übrigens



empfängt der "Bulbus" nicht nur Informationen von der Riechschleimhaut (Afferenzen), er ist gleichzeitig, über efferente Fasern, auch dem Einfluss höherer Zentren, insbesondere des *Hypothalamus*, ausgesetzt, der u.a. wesentlich an der Steuerung der Nahrungsaufnahme und des Sexualverhaltens beteiligt ist.

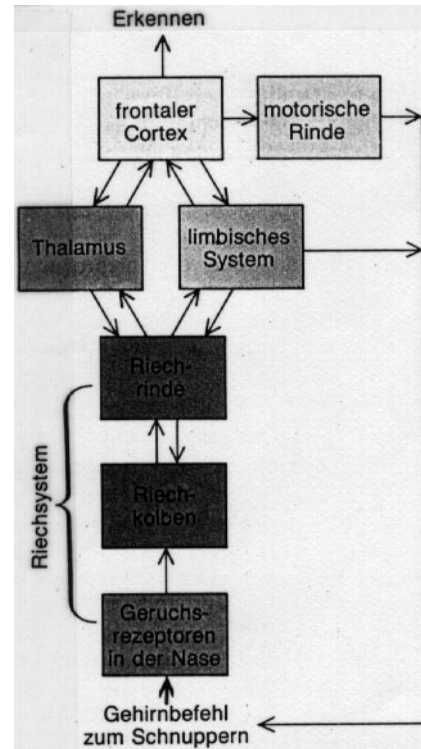
**Olfaktorisches System (Vereinfachtes Schema)**

Abkürzungen:	
no	Nervus olfactorius
tro	Tractus olfactorius
OMU	Olfaktorische Mukosa
BUO	Bulbus Olfactorius
NOA	Nucleus olfactorius anterior
PIR	Cortex piriformis
AM	Olfaktorische Kerne der Amygdala
ENT	Entohinaler Cortex

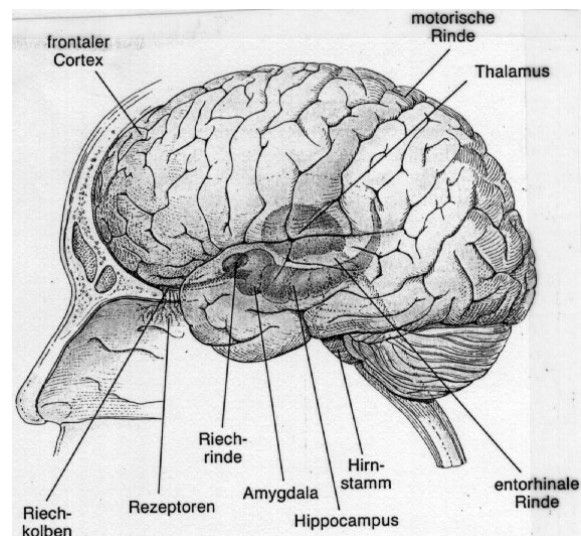


Die Wechselwirkungen zwischen Riechrinde und Riechkolben sowie Rückkopplungen mit anderen Hirnteilen sind entscheidend für die Aufrechterhaltung und Steuerung des Chaos im Riechsystem.

Ausgangspunkt der Geruchswahrnehmung ist die selbstorganisierte Aktivität des limbischen Systems (eines Hirnteils, zu dem unter anderem der entohirinale Cortex, der Hippocampus und die Amygdala gehören und das am Erzeugen von Gefühlen und an Gedächtnisprozessen beteiligt ist).



Als Ergebnis dieser Aktivität geht ein Befehl an das motorische System, einen Schnuppervorgang einzuleiten. Zugleich verbreitet das limbische System eine sogenannte Reafferenzmeldung, die alle Sinnessysteme in Bereitschaft versetzt, auf neue Informationen zu reagieren. Die infolge des Schnupfern eingehenden Signale der Geruchsrezeptoren gelangen über Riechkolben und Riehcortex, wo sie jeweils verarbeitet und gebündelt werden, zurück ins limbische System und werden dort – unter anderem durch Kombination mit den Botschaften anderer Sinnesorgane – mit Bedeutung versehen, ehe man sie schliesslich im frontalen Cortex bewusst wahrnimmt.

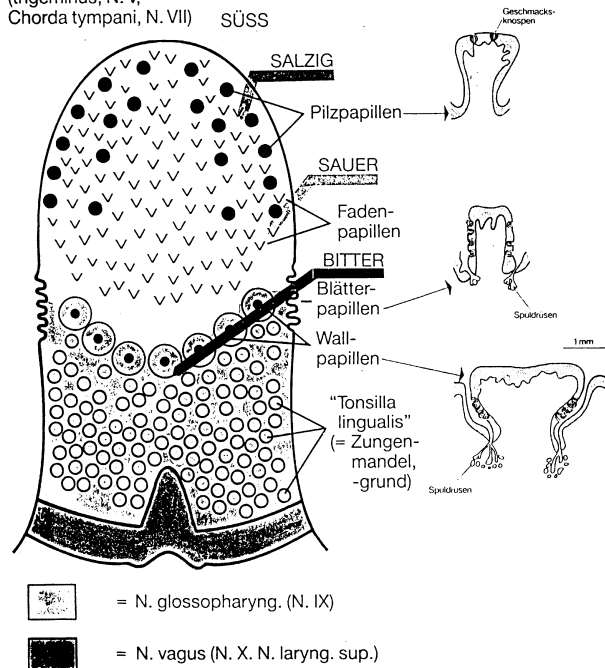


## 5.4. Geschmack: Rezeptormodelle

Die sensiblen Bereiche der Zunge - Zungenränder, Zungenspitze und Zungenrund - lassen sich in unterschiedliche Areale einteilen, in denen jeweils eine der vier Geschmacksqualitäten dominiert. Schon seit langem ist bekannt (vgl. Burdach, 1826), dass die Zungenspitze besonders für süsse Substanzen empfindlich ist, während sich die sensiblen Gebiete für bittere Substanzen vor allem im Bereich des Zungengrundes befinden. Für saure Geschmacksstoffe besteht die höchste Empfindlichkeit an den Zungenrändern, für salzige Substanzen an der Zungenspitze sowie ebenfalls in seitlichen Zungenbereichen.

Innervation durch:

N. lingualis  
(trigeminus, N. V,  
Chorda tympani, N. VII)



Zwischen dieser Verteilung qualitätsdominanter Areale auf der Zungenoberfläche und den Innervationsgebieten der an der Geschmackswahrnehmung beteiligten Nerven besteht ein gewisser Zusammenhang: die beiden vorderen Drittel der Zungenoberfläche mit den sensiblen Bereichen für die Qualitäten *süß*, *sauer* und *salzig* werden vom VII. Hirnnerv

versorgt, während das für bittere Substanzen sensible hintere Drittel der Zunge vom IX. (*Nervus glossopharyngeus*) und X. Hirnnerv (*Nervus vagus*), der auch die gustatorischen Afferenzen des Rachens und Kehlkopfes vermittelt, innerviert wird. Die vom X. Hirnnerv übermittelten Signale scheinen übrigens in der Geschmackswahrnehmung von Kindern eine wesentlichere Rolle zu spielen als bei Erwachsenen. Da das vom *N. facialis* versorgte Gebiet im wesentlichen mit den sensiblen Bereichen für die Qualitäten *süß*, *sauer* und *salzig* zusammenfällt, überwiegt bei Ausfall dieses Nervs die Wahrnehmung bitterer Stoffe, die vor allem auf der sensorischen Aktivität des IX. Hirnnervs beruht.

In die Schleimhaut der Zungenoberfläche sind verschiedenartig geformte Erhebungen eingebettet, nämlich Fadenpapillen (*Papillae filiformes*), Pilzpapillen (*Papillae fungiformes*), Wallpapillen (*Papillae vallatae*) und Blätterpapillen (*Papillae foliatae*). Während Faden- und Pilzpapillen auf der gesamten Zungenoberfläche vorkommen, sind Wall- und Blätterpapillen vornehmlich in den hinteren, vom *N. glossopharyngeus* versorgten Zungenbereichen anzutreffen. Nur Pilz-, Wall- und Blätterpapillen enthalten in Gruppen angeordnete Geschmacksrezeptoren, die als Geschmacksknospen bezeichnet werden. Diese befinden sich bei den Pilzpapillen auf der Oberfläche des etwa 1 mm breiten "Pilzhuts", bei Blätter- und Wallpapillen hingegen jeweils in den Seitenwänden. Die Blätter- und Wallpapillen enthalten ausserdem Spüldrüsen, mit deren Sekret das gustatorische Reizmaterial forttransportiert bzw. verdünnt wird. Geschmacksknospen sind auch, besonders bei Kindern, in den eingangs erwähnten sensiblen Bereichen ausserhalb der Zunge anzutreffen.

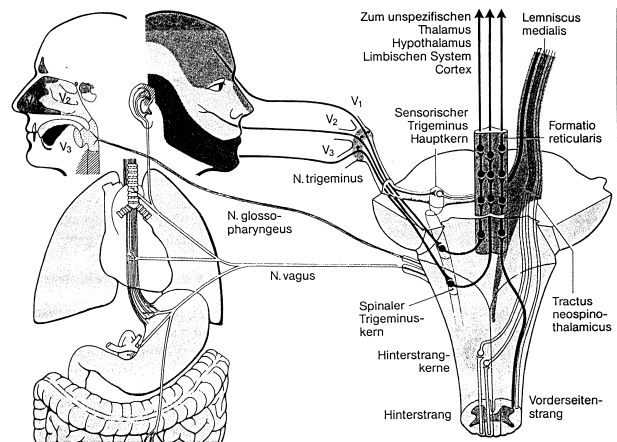
## 5.5. Geschmack: Neurophysiologie

**Zentrale Verbindungen:** Die Geschmacksfasern des VII., IX. und X. Hirnnervs, die zum Teil neben gustatorischen auch thermische und taktile Signale fortleiten vereinigen sich jeweils in beiden Hemisphären und ziehen - gemeinsam

mit spezifisch mechano- und thermosensiblen Fasern - im *Tractus solitarius* zum *Nucleus tractus solitarii* im verlängerten Mark (*Medulla oblongata*). Hier erfolgt eine Umschaltung auf andere Neurone, die als Teil des *Leminiscus me-*

*dialis* zum ventralen Thalamus ziehen. Ebenso wie visuelle und auditive Signale werden also auch gustatorische Informationen im Thalamus "vorverarbeitet". Nach Umschaltung auf ein weiteres Neuron endet die Geschmacksbahn in den relativ unspezifischen kortikalen Geschmacksfeldern des *Gyrus post-centralis*, wo auch andere Afferenzen aus der Mund und Gesichtregion repräsentiert sind. Gustatorische Signale werden also, ähnlich wie olfaktorische Informationen, nicht in spezifischen Projektionsfeldern, sondern in Hirngebieten, die auch mit nicht-gustatorischen Funktionen befasst sind, dargestellt. Eine Besonderheit der Schmeckbahn besteht allerdings darin, dass sie offenbar auf die *Integration* von gustatorischen Informationen (*süss, sauer, bitter, salzig*) mit Afferenzen anderer sensorischer Systeme hin angelegt ist: diese beginnt bereits nach der ersten Umschaltung mit der Einbeziehung von thermi-

schen Signalen, wird fortgesetzt im *Nucleus tractus solitarii* des verlängerten Marks, wo u.a. Duftinformationen hinzukommen und endet im Kortex mit der Integration von Tast- und Schmerzempfindungen.



## 5.6. Literatur

- Schmidt R.F.: Neuro- und Sinnesphysiologie; Kap. 13, 14.
- Schmidt & Thews: Physiologie des Menschen; Kap. 13.

## 5.7. Fragen zu Geruch und Geschmack

- 5-1 Welches ist die biologische Bedeutung des Geruchs beziehungsweise des Geschmacksinnes?
- 5-2 Wie stellt man sich beim Geruch die chemische Erregung der Sinneszelle vor?
- 5-3 Wo liegen auf der Zunge die "geschmacksempfindlichen" Areale?
- 5-4 Welche Sinnesempfindungen spielen zusätzlich bei der Geschmacksempfindung eine Rolle?
- 5-5 Was versteht man unter Adaptation?
- 5-6 Was versteht man unter Habituation?
- 5-7 Was versteht man unter "biologische Bedeutung"?
- 5-8 Was versteht man unter Geruchsqualität?
- 5-9 Welche experimentellen Ansätze wurden zur Identifizierung von spezifischen Geruchsrezeptoren respektive Grundgerüchen verfolgt?
- 5-10 Welche Hirnnerven spielen bei der Geruchswahrnehmung eine Rolle?
- 5-11 Welche Faktoren haben auf die mathematische Dosis-Intensitäts-Funktion einen massgebenden Einfluss?

## 6. Hören

**Ziel:** Grundlagen für das Verständnis der Zusammenhänge zwischen den physikalischen Reizen und den durch sie beim Menschen hervorgerufenen Wahrnehmungen. Für eine Beurteilung der akustischen Phänomene im Sinne arbeits- resp. umwelthygienischer Überlegungen wird auf Vorlesungen zur Ergonomie und zur Umwelthygiene verwiesen.

**Demonstrationen:** Wahrnehmungsphänomene muss man kennen, wenn man ihre Erklärungen verstehen will. Demonstrationen und Experimente sollen das Verständnis der Psychophysik im auditiven Bereich unterstützen.

### 6.1. Physikalische Grundlagen

Schall ist an die elastischen Eigenschaften von Materie gebunden. Der luftleere Raum leitet keinen Schall und kann somit die Schallübertragung verhindern. In der Materie schwingen einzelne Elemente und erzeugen Verdichtungen und Verdünnungen des Materials. Bei Gasen, z.B. Luft, kann diese Verdichtung bzw. Verdünnung als Druckerhöhung bzw. Druckerniedrigung gemessen werden. Die Druckänderungen in Gasen pflanzen sich mit der Schallgeschwindigkeit  $c$  fort (in Luft 344 m/s). Dabei wird keine Materie transportiert, sondern Schallenergie. Die Schallgeschwindigkeit ändert sich mit den elastischen Eigenschaften. Somit beeinflussen Temperatur und relative Feuchte die Schallleitung in Luft. Schall kann ferner mit der Materie „fortgetragen“ werden. Zwischen Frequenz  $f$  und Wellenlänge  $\lambda$  besteht ein reziprokes Verhältnis:  $c = \lambda \cdot f$ .

Hinweis: Die Wellenlängen können je nach Frequenz sehr kurz oder auch sehr lang sein. Anhaltspunkte liefern die Wellenlängen bei niedrigsten Hörfrequenzen und den höchsten vom menschlichen Ohr noch hörbaren Frequenzen. Im ersten Fall sind es knapp 10 m und im letzteren etwa 2 cm. Zwischen 1-2 kHz werden mit 20-35 cm die Dimensionen des menschlichen Kopfes erreicht.

Mit dem Abstand von der Schallquelle nimmt die pro Flächeneinheit auf das Ohr treffende Energie ab. Wie stark, hängt von der Art der Schallquelle ab. Es kann im Idealfall des freien Schallfeldes zwischen einer punktförmigen Schallquelle, einer linienförmigen Schallquelle, z.B. einer Bahnlinie oder einer Strasse, und einer flächenförmigen Schallquelle unterschieden werden.

Hinweis: In der Realität gibt es deutliche Abweichungen. Selten ist auch ausserhalb von Gebäuden der Fall eines freien Schallfeldes gegeben. Der Bodenbewuchs absorbiert frequenzabhängig Schallenergie. Glatte Häuserfassaden reflektieren im Gegensatz zu strukturierten Schallenergie. Beton- und Glaswände sind „schallhart“.

**Schalldruckpegel:** Zur Beschreibung der Schallintensität wird der Logarithmus eines relativen Wertes genommen (Pegel). Dazu werden die Druckwerte (in Pa) oder die Intensitätswerte (in  $W/m^2$ ) durch einen Referenzwert dividiert. Je nachdem, ob die Amplitude gewählt wird oder die Intensität, ergibt sich die obere bzw. die untere Formel. Relativmasse haben keine Dimension. Dennoch gibt man dem Schalldruckpegel (SPL, sound pressure level) die „Dimension“ Bell [B] oder üblicherweise Dezi-Bell [dB]. Die Addition zweier gleich lauter Schallquellen ergibt eine Pegelzunahme um 3 dB.

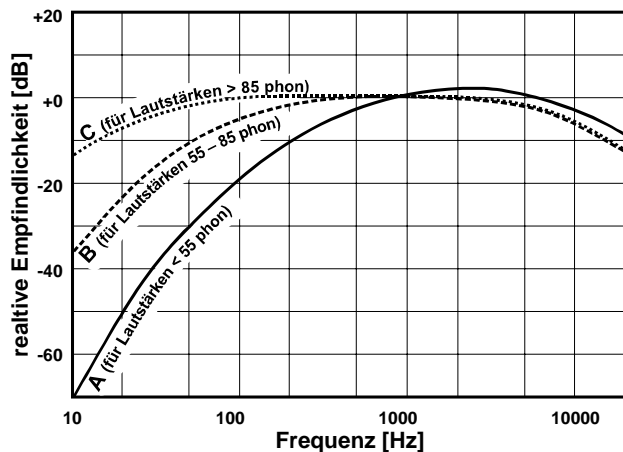
Hinweis: Zeitliche oder örtliche Addition verschiedener Schallquellen muss über eine Addition der Intensitäten der akustischen Signale erfolgen. Hierzu wird der Pegel erst delogarithmiert, die Summe gebildet und anschliessend wieder logarithmiert. Bei kohärenten Schallquellen, wenn also feste Phasenbeziehungen zwischen den Signalen bestehen, müssen die Amplituden addiert werden.

$$L = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

$P_0$  = Referenzdruck  
(= Hörschwelle bei 1 kHz Sinus =  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa)

$$L = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{J}{J_0} \right)$$

$J_0$  = Referenzintensität  
(= Hörschwelle bei 1 kHz Sinus =  $10^{-12}$   $W/m^2$ )

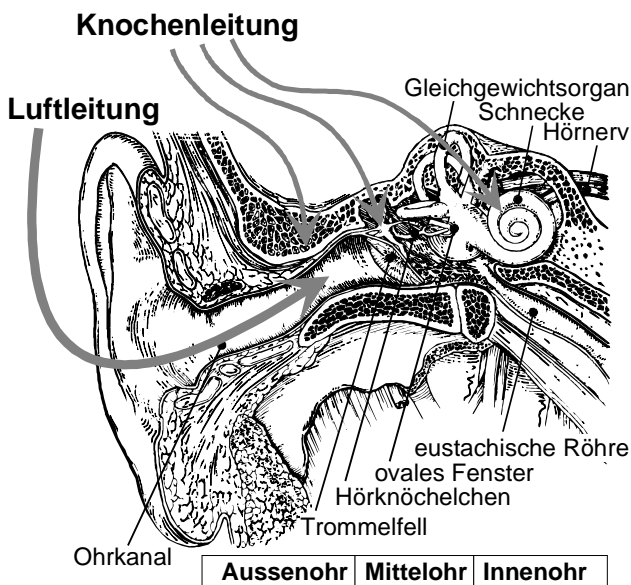


**Messung:** Für die Messung von akustischen Signalen wird die Empfindlichkeit der Messgeräte derjenigen des menschlichen Ohrs angepasst. Da sich der Frequenzverlauf der Empfindlichkeit des menschlichen Ohres mit dem Schallpegel ändert, gibt es verschiedene Anpassungskurven, nämlich die Bewertungskurven A, B, C (siehe weiter unten unter „Bewertung“). Die so bewerteten Messwerte werden zur Unterscheidung vom physikalischen SPL mit dem entsprechenden Buchstaben als dB(A), dB(B) oder dB(C) gekennzeichnet. Normal laute Signale werden mit der A-Kurve gewertet, laute mit der B-Kurve und sehr laute mit der C-Kurve.

Hinweis: Die Bewertungskurven sind nur Näherungen an den Empfindlichkeitsverlauf des Ohres. Man beschränkt sich in der Regel auf dB(A)-Werte.

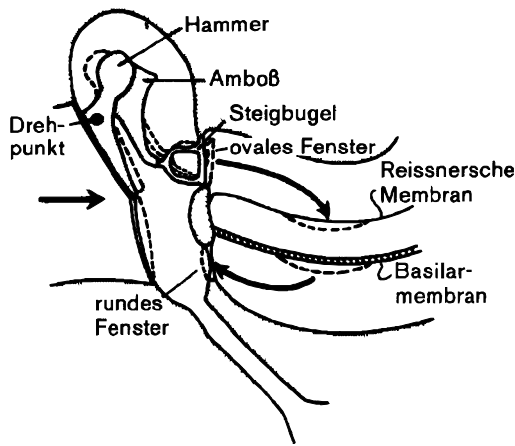
## 6.2. Anatomische Grundlagen

Die Kenntnis der funktionellen Anatomie des Ohres lässt eine Reihe von Rückschlüssen auf die Funktion des Hörsinns zu, die für die Wertung einfacher akustischer Masse von Bedeutung sind. Auch eine nur oberflächliche Kenntnis kann den Zugang zu den Phänomenen der Bewertung akustischer Signale erleichtern.

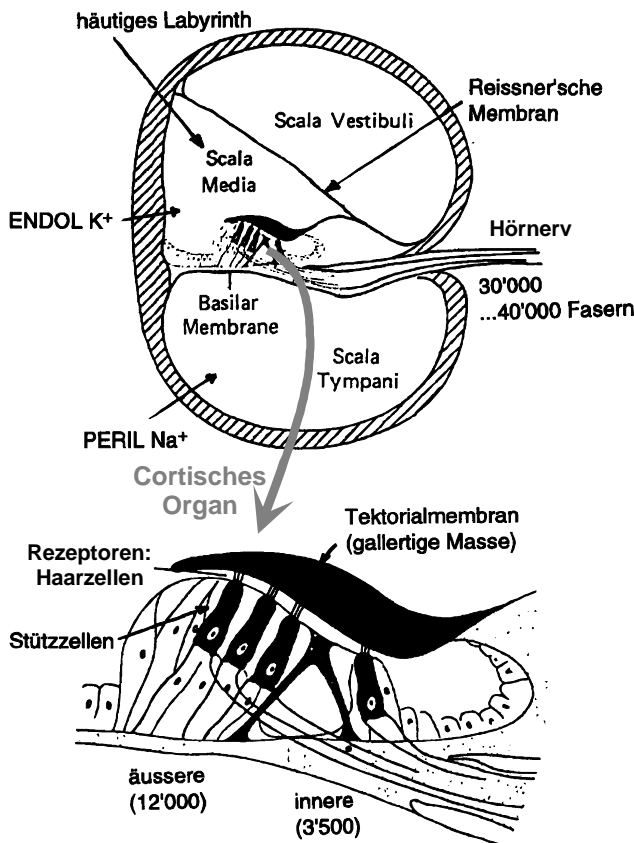


**Leitung von Luftschall und Knochen-schall im menschlichen Ohr:** Der Luftschall erreicht über zwei verschiedene Wege das Innenohr, in dem die Umsetzung der Schallenergie in nervöse Erregung geschieht. Es sind die Luftleitung und die Knochenleitung (Bild). Unter normalen Bedingungen ist nur die Luftleitung bedeutungsvoll. Wird diese allerdings durch Hörschutz vermindert, gewinnt die Knochenleitung unter Umgehung des Mittelohres an Bedeutung. Sie ist etwa 25-30 dB schwächer als die Luftleitung.

Der Luftschall trifft auf das **Trommelfell**, das den äusseren Gehörgang abschliesst. Es überträgt die Schallenergie auf die **Gehörknöchelchen** des Mittelohrs (Hammer, Amboss und Steigbügel). Die Fussplatte des Steigbügels nimmt am **ovalen Fenster** Kontakt mit dem Innenohr auf. Die Flüssigkeitssäule im Innenohr wird bei Bewegung des Steigbügels in Schwingungen versetzt. Das runde Fenster garantiert einen Druckausgleich. Die komplizierte Übertragung gewährleistet eine Impedanzanpassung. Funktioniert diese bei einer Erkältung (Tubenkatarrh) nicht, werden Geräusche deutlich leiser wahrgenommen. Tuben verhindern bei Höhenwechsel den schnellen Druckausgleich zwischen Innenohr- und Nasen-Rachen-Raum.



Am Steigbügel greift ein winziger glatter Muskel an (Musculus stapedius). Er kann die Bewegung des Steigbügels einschränken und so bei grosser Lautstärke die Übertragung dämpfen. Mit einer Ansprechzeit von etwa 3 ms kommt seine Wirkung für Knallereignisse, wie Kleinkaliberschüsse allerdings zu spät. Die Schutzwirkung ist also auf Dauergeräusche beschränkt.

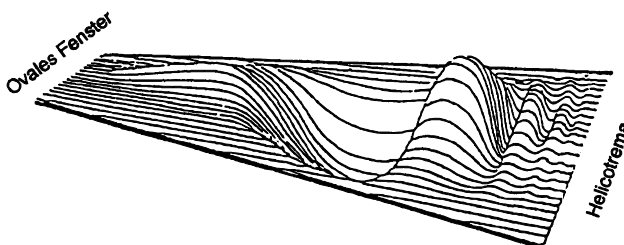


Anatomischer Aufbau des Innenohrs: Die Schwingung der Flüssigkeitssäule im Innenohr versetzt die Deckmembran (Tektorialmembran) in Bewegung. Dadurch werden die Haare der Haarzellen, der eigentlichen Sensoren des Ohres elektrisch aktiv. Je stärker die Bewegung ist, um so grösser ist das Generatorpotential.

Die Sensoren sind in einer inneren und drei äusseren Reihen auf der Basilmembran angeordnet. Während die innere Einzelreihe vorwiegend für die Wahrnehmung verantwortlich ist, können die drei äusseren aktiv die Empfindlichkeit des Ohres verstellen.

Hinweis: Die Aktivität der äusseren Haarzellen kann mit geeigneten Mikrofonen im äusseren Gehörgang als otoakustische Emission (OAE) gemessen werden.

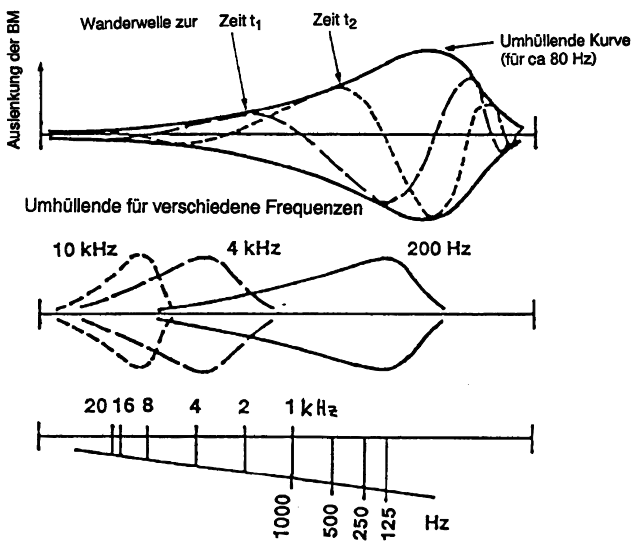
### 6.3. Biomechanik der Basilmembran des Innenohrs



Dreidimensionale Darstellung: Die Schwingung der Flüssigkeitssäule führt zu einer Schwingung der Basilmembran. Die Darstellung zeigt ein Momentanbild der Auslenkung für eine mittlere Frequenz. Die Membran ist an den Seiten befestigt. Ihre Breite nimmt ausgehend vom ovalen Fenster mit dem Steigbügel (links) zum Ende, dem Helicotrema zu, bei dem die Scala vestibuli mit der Scala tympani verbunden ist.

Aufeinander folgende Schwingungsbilder der Basilarmembran im senkrechten Schnitt für eine feste Sinusfrequenz: Gezeigt wird ein Querschnitt der schwingenden Membran für einen Sinuston 80 Hz (unteres Bild, oben). Dargestellt ist die Auslenkung der Membran zu zwei verschiedenen Zeitpunkten (gestrichelte Kurven). Die sogenannte Wanderwelle läuft von links (ovales Fenster) nach rechts (Helicotrema). Die ausgezogene Kurve ist die Umhüllende aller Maxima. Sie bestimmt die Bewegung der Härchen der Sensoren. Ein einzelner Sinuston regt also nicht

nur wie beim Klavier ein schmales Gebiet an, sondern ein sehr breites. Nach dem Wanderwellenmodell von Bekesy werden Bereiche, die für höhere Frequenzen empfindlich sind, stärker miterregt als solche, die für niedrigere empfindlich sind. Es besteht eine deutliche Asymmetrie der Miterregung. Es lässt sich daraus ableiten, dass ein Ton die Empfindlichkeit der Membran und damit der Sensoren für andere Frequenzen verändert, also ein asymmetrischer Effekt der Verdeckung besteht. Diesem Effekt trägt die Bewertung nach Zwicker Rechnung.

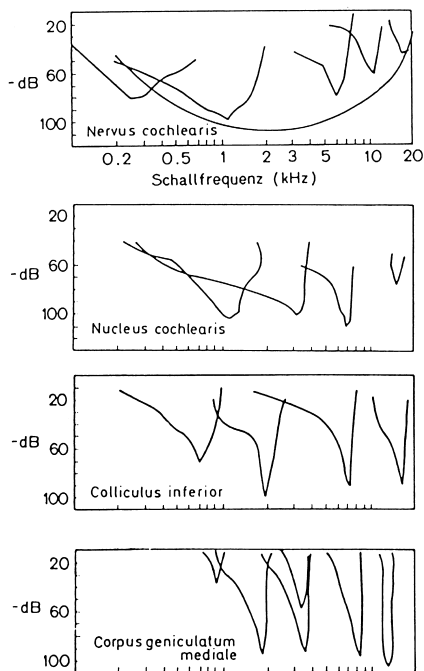


Umhüllende Kurven entsprechen verschiedenen Sinusfrequenzen: Der Ort des Maximums der Auslenkung verschiebt sich mit abnehmender Frequenz vom ovalen Fenster fort Richtung Helicotrema (Mitte). Damit kommt es zu einer örtlichen Abbildung der Frequenzen auf der Basilarmembran. Somit identifizieren auch Sensoren geringer zeitlicher Auflösung hohe Frequenzen.

Distanz der maximalen Auslenkungen vom Steigbügel: Sie sind etwa logarithmisch auf der Basilarmembran verteilt (unten). Damit ergibt sich eine gewisse Plausibilität für die Wahl einer logarithmischen Frequenzskala in der Akustik.

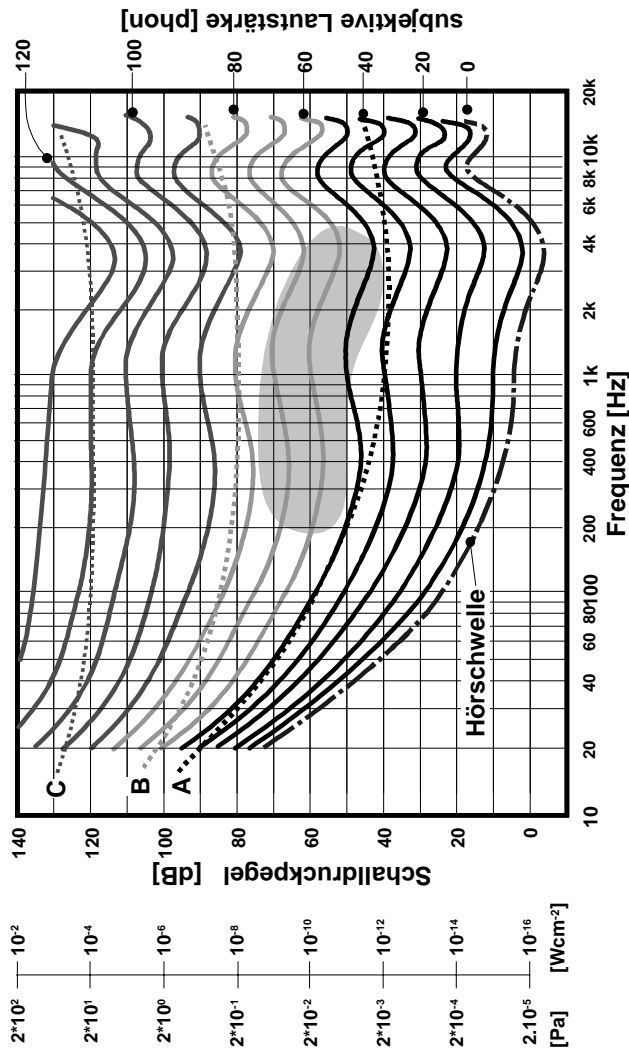
Hinweis: Das passive biomechanische Modell gibt nach neueren Erkenntnissen nur bedingt die Realität wieder. Die aktive Rolle der äusseren Haarzellen verschärft die Maxima der Auslenkung.

## 6.4. Physiologie



Sensorische Tuningkurven auf verschiedenen Ebenen der Verarbeitung: Die breiten mechanischen Tuningkurven der Basilarmembran finden sich auch auf dem nervösen Weg vom Hörnerven (Nervus cochlearis) bis zum mittleren Kniehöcker (Corpus geniculatum mediale) im Gehirn wieder. Die Frequenzselektivität steigt von Verarbeitungsstufe zu Verarbeitungsstufe. Erhalten bleibt die Asymmetrie der Miterregung.

## 6.5. Psychophysik (energetische Betrachtung)



**Hörschwelle:** Die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs ändert sich mit der Frequenz angebotener Sinustöne. Die strichpunktierte Kurve gibt den Verlauf der Hörschwelle als Funktion der Frequenz wieder. Sie wird auch als 0 phon-Kurve bezeichnet. Je niedriger die Frequenz ist, um so mehr physikalische Energie (dB, SPL) braucht es. Dasselbe gilt für den Bereich ansteigender Frequenzen.

Hinweis: Die 0 phon-Kurve gilt für Ohren mittlerer Empfindlichkeit. Im individuellen Einzelfall können auch negative phon-Werte gehört werden.

**Bewertung:** Neben der Hörschwellenkurve (0 phon) interessiert der Verlauf von Kurven gleicher Lautstärke. Im Diagramm, dem **Hörfeld**, sind solche Kurven gleicher Lautstärke also gleichen phon-Wertes eingetragen. Sie gelten nur für Sinustöne. Die Kurven geben an, wie gross der physikalische Schalldruckpegel SPL sein muss, damit ein Sinuston beliebiger Frequenz gleich lautstark wie ein solcher von 1 kHz wahrgenommen wird. Bei 1 kHz stimmt der phon-Wert per Definition mit dem physikalischen Schalldruckpegel SPL überein. Die Kurven gleicher Lautstärke flachen mit zunehmender Lautstärke ab. Dies gilt vor allem für den niederfrequenten Bereich. Bei 2 – 5 kHz weisen die Kurven ihre grösste Empfindlichkeit auf. Die punktierten, mit den Buchstaben A, B, C bezeichneten Kurven entsprechen den Dämpfungskurven der Schallpegelmesser.

**Sprachbereich:** Der nierenförmige, schattierte Bereich zwischen 200 Hz und 5 kHz einerseits und 50 phon und 70 phon andererseits kennzeichnet den Bereich der menschlichen Sprache.

Hinweis: Dem Hörfeld liegen Sinustöne zu Grunde. Streng genommen gilt es also auch nur für diese. Für zusammengesetzte akustische Signale werden teilweise deutliche Abweichung wahrgenommen. Auch werden Sprünge der Lautstärke (Transienten), die besonders wahrgenommen werden, nicht berücksichtigt. Die menschliche Sprache ist durch schnelle Änderungen der Lautstärke gekennzeichnet.



Schallpegel- änderung	Wahrnehmung
0-2 dB	nicht wahrnehmbare Änderung
2-5 dB	gerade wahrnehmbare Änderung
5-10 dB	deutlich wahrnehmbare Änderung
10-20 dB	grosse, überzeugende Änderung
> 20 dB	überaus grosse Änderung

Die aus dem Hörfeld abgeleiteten dB(A) Werte erlauben unabhängig von den angeführten Einschränkungen einen qualitativen Überblick über das akustische Geschehen. Im Bild sind dB(A) Änderungen im Vergleich zur Wahrnehmung zusammengestellt. Sie gelten für „langsame“ Pegeländerungen. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass das Ohr auf schnelle Pegeländerungen deutlich empfindlicher reagiert.

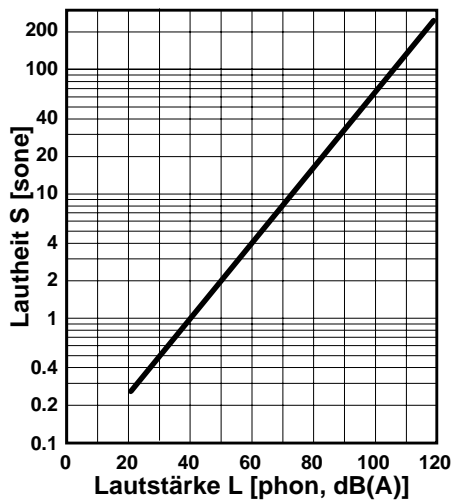
Hinweis: Mehrheitlich wird bei Pegeländerungen nur die Einheit dB verwendet und auf das umständliche dB(A) verzichtet.

Lautstärke	[ dB(A) ]
Flüstern	36
leises Sprechen	42
entspanntes Sprechen	48
normales Sprechen	60
lautes Sprechen	66
sehr lautes Sprechen	78
Schreien	84

Die Tabelle gibt einen qualitativen Anhaltspunkt über die Lautstärke menschlicher Sprache, wie sie mit einem Schallpegelmesser bestimmt wird. Im unteren und im oberen Pegelbereich ist die Verständlichkeit meistens eingeschränkt.

Hinweis: Bei bekannten akustischen Signalen sollte der Abstand zwischen Signal und Hintergrund (Signal-Rausch-Abstand) wenigstens 10dB betragen.

## 6.6. Psychophysik (Wahrnehmung)



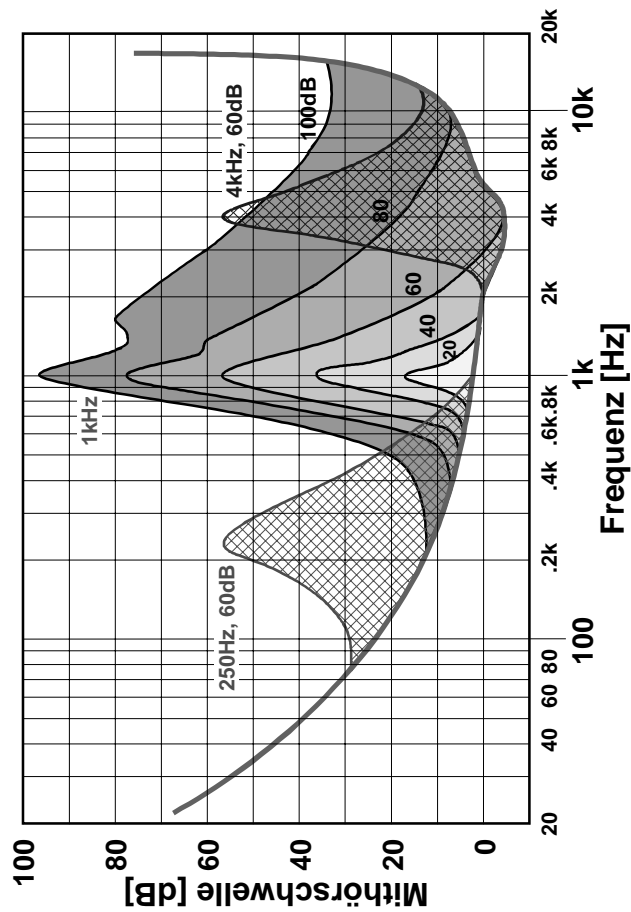
$$S = 2^{\left(\frac{L-40}{10}\right)}$$

Lautheit bei 1 kHz

Lautheit: Die Kurven gleicher Lautstärke wurden aus einem Abgleich zweier Sinustöne auf gleiche Lautstärke abgeleitet. Weiterhin wurde bei 1kHz eine Anbindung an die physikalische Energie vorgenommen. Offen bleibt die Frage, um wie viel lauter nun ein Signal von 50 phon bzw. 50 dB(A) ist als ein solches von 40 phon bzw. 40 dB(A). Die Beobachtung zeigt sehr deutlich, dass Lautheit etwas anderes ist als Lautstärke. Es muss demnach ein weiteres Mass eingeführt werden, die Lautheit, welche die Dimension sone erhalten hat. Qualitativ gilt zwischen Lautheit und Lautstärke die Beziehung der Abbildung. Da 40 phon einer leisen Umgangssprache entspricht, wird einer Lautstärke von 40 phon eine Lautheit von 1 sone zugeordnet. Eine Zunahme der Lautstärke um 10 phon bzw. dB(A) entspricht dann ungefähr einer Verdoppelung des sone-Wertes. Dieses entspricht einer weiteren Logarithmierung.

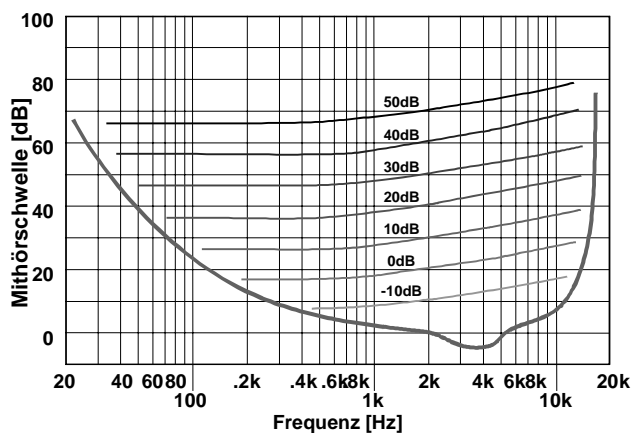
Situation	Lautstärke L	Lautheit S
Wohnviertel nachts	40 phon	1 sone
Konversation normal	60 phon	4 sone
Staubsauger	80 phon	16 sone
Donner	120 phon	256 sone

Zur Verdeutlichung der Lautstärke ist hier eine Liste der Lautstärkepegel und der Lautheit bekannter Schallquellen zusammengestellt.

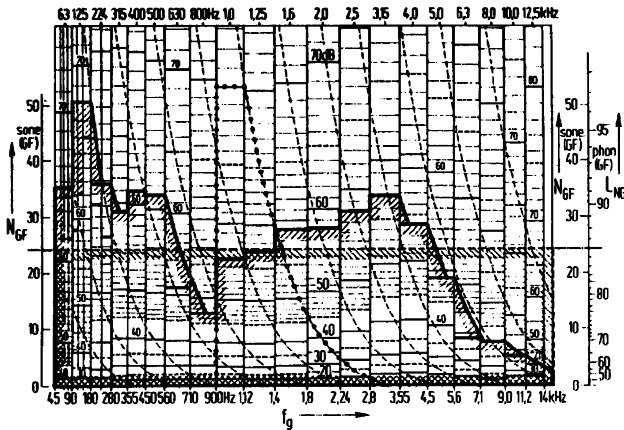


In der Realität finden sich nur selten sinusförmige akustische Signale. D.h., die Grundannahme, die bei der Ableitung des Hörfeldes gemacht wurde mag zwar für energetische Betrachtungen ausreichen, für eine hörgerechte Beurteilung im Bereich der Kommunikation müssen die nichtlinearen Übertragungseigenschaften (Tuningkurven) des Ohres besser berücksichtigt werden. Dieses geschieht mit dem Bewertungsverfahren nach Zwicker. Die Grundlagen sind in dieser und der folgenden Abbildung für verschiedene Versuchsbedingungen qualitativ zusammengestellt. Die Ausgangskurve ist jeweils die Hörschwellenkurve (0-phon). Der Versuchsperson wird beispielsweise ein Sinuston von 1 kHz mit einer Lautstärke von 40 phon angeboten. Dieser bringt die Basilmembran asymmetrisch zum Schwingen. Nun wird gleichzeitig die „Hörschwelle“ für einen zusätzlichen Sinuston anderer oder gleicher Frequenz dargeboten. Dieser zweite Ton muss ebenfalls 40 phon haben, wenn er gerade gut wahrgenommen werden soll, denn dann gibt sich eine Lautstärkenänderung um 3 dB. Weicht die Frequenz des zweiten Testtones stark vom Basiston ab, ist keine Änderung der Hörschwelle (Mithörschwelle) festzustellen. Es ergibt sich eine neue Hörschwellenkurve, die Mithörschwelle (in der Abb. mit der Zahl 40 indiziert). Diese ist erwartungsgemäss schiefsymmetrisch. Töne, die im Hörfeld unter dieser Kurve liegen, werden nicht gehört, sondern verdeckt (Verdeckungskurve). Je lauter der Basiston ist, um so grösser ist der verdeckte Bereich, um so schlechter wird auch das Frequenzauflösungsvermögen des Ohres. Die Verdeckung betrifft vor allem Töne oberhalb des Basistones.

Hinweis: Das vereinfachte Bewertungsmodell nach Zwicker berücksichtigt nur die höheren Frequenzen.



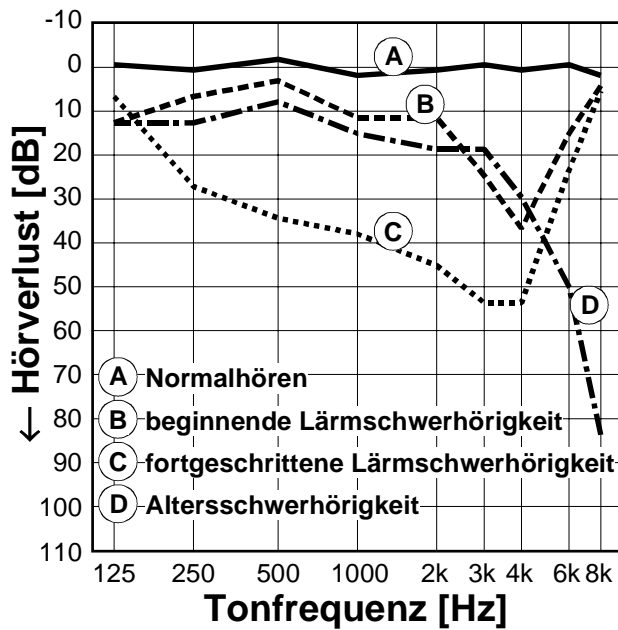
Die Gleichzeitigkeit zweier Sinustöne ist selbstverständlich nur ein Sonderfall. Ein anderer Sonderfall ist hier dargestellt. Es liegt nicht ein Basiston vor, sondern ein breitbandiges weisses Rauschen. Die Verdeckungskurven sind in diesem Fall bis etwa 500 Hz achsenparallele Geraden, die oberhalb dieses Frequenzbereiches linear ansteigen. Sie weichen damit völlig von den dB(A) Bewertungskurven ab. In einem solchen Fall wird die Lautstärke also besser ohne Bewertungsfilter gemessen.



Das Bewertungsverfahren von Zwicker berücksichtigt hörgerecht die Verdeckung verschiedener Frequenzen, die sich aus den Eigenschaften der Basilmembran ergeben. Für die Berechnung wird die Schallenergie in 21 Frequenzbändern gemessen. Ausserdem wird nicht die Lautstärke, sondern die Lautheit von Schallsignalen berechnet. Die hörgerechte Bewertung nach dem Zwickerverfahren erklärt die Tatsache, dass die subjektive Lautheit verschiedener Schallquellen sich bei gleicher gemessener Lautstärke in dB(A) bis zu einem Faktor 3,5 unterscheiden kann.

Hinweis: Da für die Bewertung die Schallenergie in 21 Frequenzbändern ermittelt werden muss, ist der messtechnische Aufwand deutlich grösser als bei einfachen Messungen des Schallpegels. Aus gleicher gemessener Lautstärke kann nur bei Signalen ähnlicher Frequenzzusammensetzung auf gleiche Lautheit für das menschliche Ohr rückgeschlossen werden.

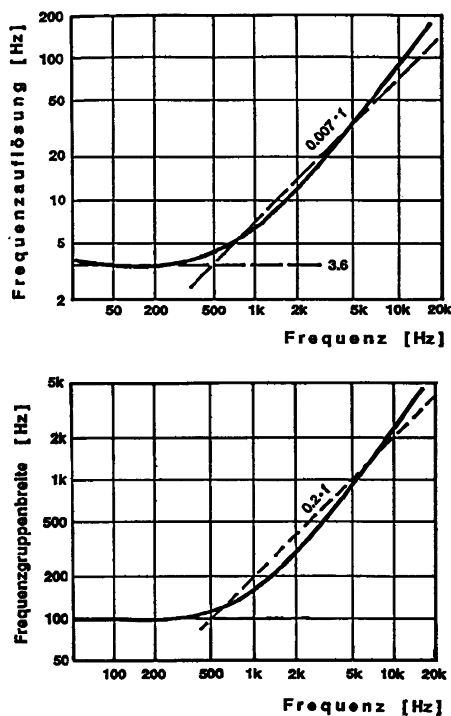
### 6.7. Ton-Audiometrie



Lärmschwerhörigkeit: Zu hohe und zu lange einwirkende Schallintensitäten können das Innenohr schädigen. Die Folge ist ein bleibender irreparabler Hörschaden. Um die Hörfähigkeit des Menschen zu messen, benutzt man die Audiometrie. Im Prinzip macht man eine Hörschwellenbestimmung. Der Hörschwellenverlauf eines Normalhörenden wird meist von der ermittelten Hörschwelle subtrahiert. Daraus ergeben sich die im Bild gezeigten Kurven. Ein Normalhörender hat bei 0 dB eine horizontale Linie. Bei lärmbedingten Hörschäden kann eine charakteristische Senke bei 4 kHz beobachtet werden. Da ist das Ohr am empfindlichsten.

Altersschwerhörigkeit: Der Hörverlust beginnt bei hohen Frequenzen. Frauen haben durchschnittlich mit geringerer Altersschwerhörigkeit zu rechnen als Männer.

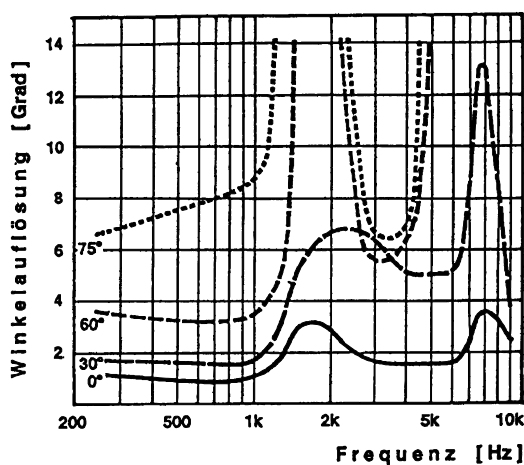
## 6.8. Frequenzauflösung



Das Frequenzauflösungsvermögen des Ohres ist ausserordentlich gut. Bis etwa 500 Hz beträgt es konstant 3,6 Hz. Allerdings werden diese Werte nicht absolut, sondern nur im Vergleich erreicht. Es ist also ein typischer Schwellenwert, der aus einer Änderung der Frequenz resultiert. Das absolute Unterscheidungsvermögen ist deutlich schlechter. Oberhalb von 500 Hz ändert sich das Frequenzauflösungsvermögen linear mit dem Logarithmus der Frequenz. 7 % Änderung werden gerade wahrgenommen.

Neben dem Frequenzauflösungsvermögen sind zudem die Integrationseigenschaften des Ohres wichtig. Der Bereich in dem das Ohr die Schallenergie einigermaßen integriert, wird eine Frequenzgruppe genannt. Die Breite solcher Frequenzgruppen ist dargestellt. Wieder gibt es bis zu 500 Hz eine konstante Frequenzgruppenbreite von 100 Hz. Oberhalb steigt die Breite linear mit dem Logarithmus an. Die Breite beträgt 20% der Frequenz. Das entspricht ca. einer Quinte.

## 6.9. Richtungshören



Schall wird auf dem Übertragungsweg nicht nur in der Amplitude, sondern auch in der Frequenzzusammensetzung verändert. Diese Änderung hängt von der Form der Ohrmuscheln und des Gehörganges ab. Auch kommt es zu Schallreflexionen an Schulter und Brustkorb. Für akustische Ereignisse mit einem hinreichenden Frequenzumfang, die eventuell auch noch über die Zeit die Lautstärke verändern ist, also volles Richtungshören möglich. Entfernungshören basiert wesentlich auf der spektralen Zusammensetzung bekannter Geräusche. Mit zunehmender

Richtungshören ist ein komplexer Vorgang, der Erfahrung voraussetzt. Es entstehen am Ohr Laufzeitunterschiede und auch unterschiedliche Schallstärken. Hieraus lässt sich prinzipiell ein links und ein rechts ermitteln. Für die Beurteilung von vorn oder hinten bzw. von oben oder unten reicht dieses Signal aber nicht aus. Eine solche Unterscheidung ist geübten Hörern aber auch ohne Kopfwendung in Richtung Schallquelle möglich. Also muss es weitere physikalische Parameter zur Beurteilung geben. Im Bild dargestellt ist der gerade bemerkbare Richtungsunterschied für kurze Tonsignale unterschiedlicher Frequenz für verschiedene Richtungen.

Die Distanz von der Quelle werden die höheren Frequenzen schneller abgeschwächt als die niedrigeren. Zusätzliche Signale wie etwa Vibrationen, die im allgemeinen nur bei nahen Quellen erwartet werden, lassen eine Schallquelle näher erscheinen als ohne solche Vibration.

Hinweis: Reine Sinustöne können nicht geortet werden. Sie werden zumeist als unangenehm empfunden. Dieses könnte mit der Unfähigkeit einer richtigen Lokalisation verknüpft sein. Eingriffe in das Frequenzspektrum verändern den Hörraum. Die Fähigkeit vorn und hinten wahrzunehmen sinkt beim Tragen von Hörschutz.

---

## 6.10. Literatur

---

- Lindsay, P.H., Norman D.A.: Human Information Processing; Kap. 4 bis 6.
- Schmidt & Thews: Physiologie des Menschen; Kap. 12.2.
- Schmidt R.F.: Neuro- und Sinnesphysiologie; Kap. 11.
- Zwicker E.: Psychoakustik. Springer-Verlag, Berlin (1982).

---

## 6.11. Fragen zum Hören

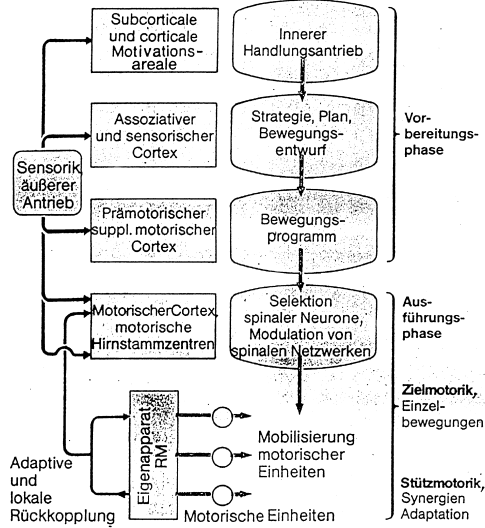
---

- 6-1 Wie sind die elektrischen Impulse im Hörnerv kodiert? Welche Theorie(n) ist (sind) damit verbunden?
- 6-2 Was ist Schall, nach welchen Gesetzmässigkeiten breitet er sich aus (mit und ohne Hindernisse) und wie wird er gemessen (Verschiedene Grössen mit Dimensionen bezüglich Stärke und zeitlicher Integration) und analysiert (Verteilung der Stärke bezüglich der Frequenz)?
- 6-3 Im Innenohr findet eine Frequenz-Orts-Transformation statt. Wie funktioniert dies nach der heute gängigen Theorie?
- 6-4 Beschreiben Sie subjektive und objektive Methoden zur Messung der Funktion der Gehörs.
- 6-5 Welchen psychoakustischen Tatsachen trägt das "Zwickerverfahren" Rechnung und wie werden sie im Verfahren berücksichtigt. Wie kommt das Stevenssche Potenzgesetz ins Spiel?
- 6-6 Bringen Sie die Ausdrücke: Schalldruck, Ton, Lautheit, Schallintensität, Tonheit, dB(A), Frequenzauflösung, Hz, Hörschwelle, Mel-Skala, absolute und relative Schwelle, Watt/m<sup>2</sup>, sone, Pegellautstärke, dB, Frequenz, Phon, Frequenzgruppenbreite, Pascal und Bark in Diagrammen untereinander soweit möglich in Beziehung.
- 6-7 Beschreiben Sie die Anatomie und die Funktion des Aussen- und des Mittelohres (frequenzabhängige Übertragungseigenschaften sollen dabei erklärt werden).
- 6-8 Was stellen Tuningkurven dar und wie sind die Kurvenverläufe für verschiedene Frequenzen erklärbar?
- 6-9 Wieviel lauter empfindet der überdurchschnittlich gut hörende Mensch zehn Schallquellen mit dem Pegel von je 0 dB gegenüber der einzelnen Schallquelle von 0 dB?
- 6-10 Welche akustischen und auditiven Gegebenheiten nutzt der Mensch zur Erfahrung des akustischen Raumes?
- 6-11 Beschreiben Sie die Anatomie des Innenohrs.
- 6-12 Welche physiologischen Gegebenheiten stecken hinter dem Verdeckungseffekt und wie ist der Einfluss der Bandbreite eines verdeckenden Geräusches auf den Effekt?

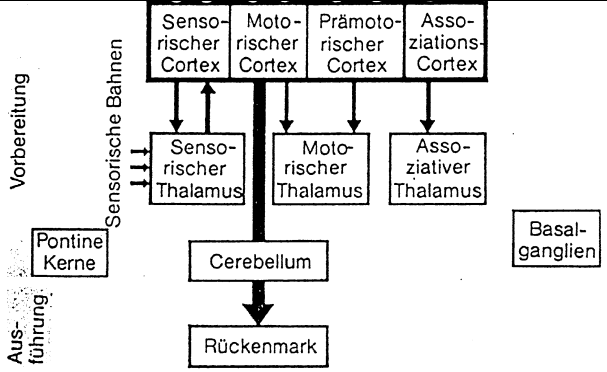
# 7. Gleichgewicht und Psychotoxikologie

Referent: Thomas Läubli

## 7.1. Nervöse Kontrolle von Haltung und Bewegung im Überblick



Motorische Systeme im Überblick. Hierarchische Darstellung des zentralnervösen Erregungsflusses bei Haltung und Bewegung. Zur Vereinfachung sind einige höhere motorische Zentren (Kleinhirn, Stammganglien, motorischer Thalamus) weggelassen. Ihre Einbindung in das motorische System ist in der unteren Abbildung im Überblick dargestellt [Rohen, 1985].

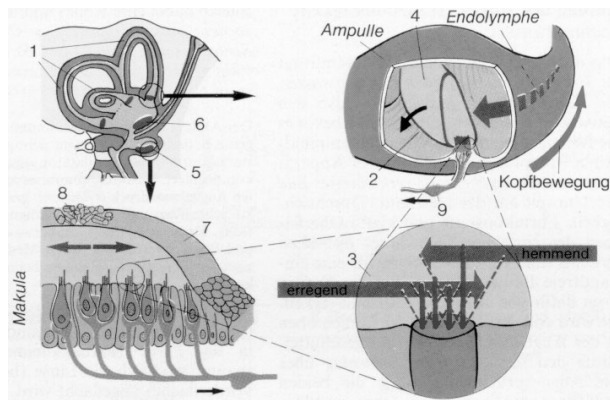


Übersicht über die Erregungsflüsse im motorischen System unter Einschluss der in der oberen Abbildung nicht eingezeichneten Zentren. In dieser Darstellung wird die partnerschaftliche Zusammenarbeit der verschiedenen höheren motorischen Zentren durch ihre horizontale Anordnung ausgedrückt (vgl. obere Abb.) und die Bedeutung der internen Funktionsschleifen, v.a. derjenigen über die Basalganglien und das Cerebellum, bei der Vorbereitung einer Bewegung hervorgehoben [Rohen, 1985].

Systeme	Zugehörige Zentren des NS	Funktionen	Rezeptoren für die zugehörigen Afferenzen	
1. Einfache myostatische Regelungen	RM (gleiches Segment)	Eigenreflexe [bevorzugt Streckreflexe (Stehen)] – einfache, motorische Automatismen	Muskelspindeln, Sehnen-spindeln	Automatische, unbewusste Reaktionen
2. Komplexe motorische Regelungen	RM (mehrere Segmente)	Fremdreflexe [isolierte, zweckbezogene Einzelbewegungen (Abwehr-, Wischbewegungen), bevorzugt Beugereflexe]	Muskel- und Hautrezeptoren	
3. Statisch-vestibuläres System	Rautenhirn und RM	Gleichgewichts und Tonusregulationen (Stell- und Haltere-reflexe)	Gleichgewichtsrezeptoren sowie Haut- und Muskelrezeptoren	Zunehmende Bewusstheit
4. Extrapyramidales motorisches System	Hirnstamm (subkortikale Zentren im End-, Zwischen- und Mittelhirn) COEPS	Affektive Bewegungen, erlernte Bewegungen, „unwillkürliche Willkürmotorik“	Indirekt alle Sinnesorgane	
5. Pyramidales motorisches System	Grosshirnrinde	Freie, neu entwickelte Bewegungsformen		Bewusste, willkürmotorische Intention

## 7.2. Gleichgewichtssinn

### Gleichgewichts-(Vestibular-)organ



Dreht sich der Körper längere Zeit mit konstanter Geschwindigkeit, kommt die Relativbewegung Bogen-gang/ Endolymphe zur Ruhe. Beim *Abbremsen* der Drehbewegung kreist die Endolymphe noch etwas weiter: Es entsteht wieder eine Relativströmung, jetzt aber in der anderen Richtung als beim Start. Erhöhte beim Start der Drehbewegung die Kupulaverbiegung die Frequenz der fortgeleiteten Aktionspotentiale, kommt es beim Bremsen zu deren Hemmung und umgekehrt.

Das Vestibularorgan enthält noch zwei weitere Sinnesepithelien, die Macula sacculi (5) und die Macula utriculi (6). Auch sie enthalten Sinneszellen mit Kino- und Stereozilien, die in eine gallertartige Membran (7) eintauchen, welche mit relativ schweren (Dichte  $\approx 3,0$ ) Kalzitkristallen (Statolithen, 8) angereichert ist. Diese „Steinchen“ verschieben die Statolithenmembran mit den Zilien (3), und zwar bei wechselnden Kopfbewegungen infolge ihrer *Trägheit* und bei wechselnden Ruhestellungen des Kopfes im Raum infolge der Richtungsänderung der *Erdanziehung*.

Das Gleichgewichts- oder Vestibularorgan liegt nahe der Cochlea beidseits im Felsenbein. Die drei zueinander senkrecht stehenden Bogengänge (1) enthalten in ihrer Ampulle je eine Leiste (Krista, 2) mit (sekundären) Sinneszellen, deren Zilien (3) in die schwenkbare Kupula (4) eingebettet sind (eine lange Kinozilie am Zellrand und ca. 80 kurze Stereozilien). Dreht sich der Kopf, so bewegt sich der Bogengang zwangsläufig mit. Die darin enthaltene Endolymphe (die die gleiche Dichte wie die Kupula hat) kann infolge ihrer Trägheit dieser Bewegung nicht gleich folgen, d. h., es kommt kurzzeitig zu einer *Strömung* im Bogengang, die die Kupula und damit alle Zilien z. B. in Richtung Kinozilie verbiegt, was wiederum zu einer Erregung der ableitenden Nervenfasern führt. *Drei* Bogengänge sind nötig, um Drehbewegungen um alle möglichen Raumachsen (Nicken, Wenden und Seitwärtsneigen des Kopfes) zu registrieren.

Die uneinheitliche Ausrichtung der Sinneszellen (d.h. der Kinozilie) im Makulaepithel ermöglicht die Erkennung verschiedener Richtungen. Die Aufgaben der Maculae sind es also, geradlinige (Translations-)Bewegungen und Abweichungen des Kopfes von der Senkrechten zu melden, während es Aufgabe der Bogengangsorgane ist, Winkel-(Dreh-)Beschleunigungen zu messen.

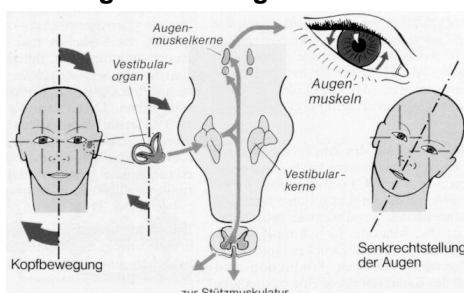
Die bipolaren Neuronen des Ganglion vestibulare (9) leiten die Erregung zu den Vestibularkernen weiter. Wichtige Bahnen ziehen von dort zu den Augenmuskelnkernen, zum Kleinhirn (siehe Kap.7.3), zu den Motoneuronen der Skelettmuskulatur und zum Gyrus postcentralis (bewusste Raumorientierung). Die Reflexe, die vom Vestibularorgan ausgehen, dienen v. a. zwei Mechanismen: a) der Gleichgewichtserhaltung des Körpers (Stützmotorik) und b) dem „Im-Auge-Behalten“ der Umwelt trotz Kopf und Körperbewegungen (Blickmotorik) [Silbernagl et al. 1988].

### Vestibularorgan: Wirkung auf die Stützmotorik



Wird z.B. unter einer Versuchsperson die Unterlage gekippt, kommt es über eine Reizung des Vestibularorgans zu starker Streckung von Arm und Oberschenkel auf der Talseite (Stützung) und zur Beugung des Arms auf der Bergseite (2). Ein Patient mit gestörtem Gleichgewichtsorgan kann nicht so reagieren und kippt um (3) [Silbernagl et al. 1988].

### Vestibularorgan: Wirkung auf die Blickmotorik



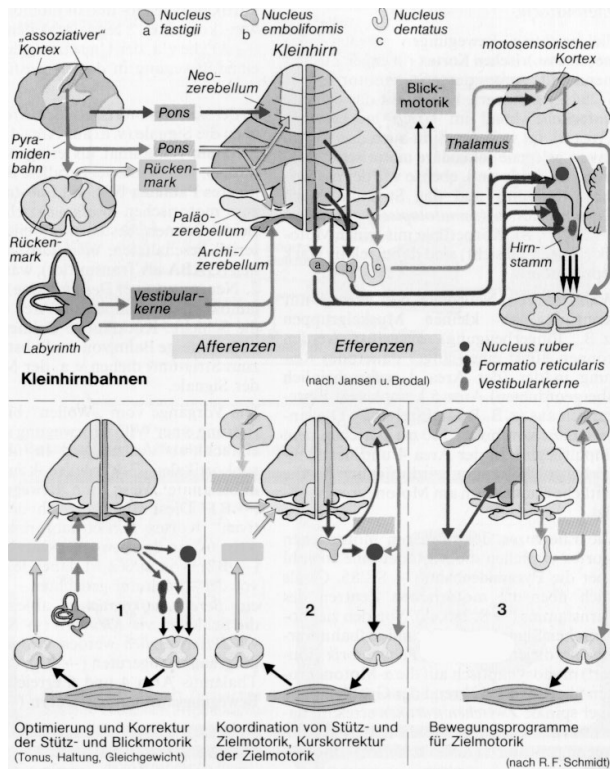
Die enge Verbindung des Vestibularorganes mit den Augenmuskelnkernen ist daraus zu ersehen, dass jede Abweichung der Kopfstellung sofort durch eine gegenläufige Augenbewegung korrigiert wird; die Raumorientierung wird dadurch sehr erleichtert.

Da das Vestibularorgan selbst nicht unterscheiden kann, ob sich nur der Kopf bewegt hat oder aber der ganze Körper (was für die Stützmotorik natürlich wichtig ist), bestehen auch zwischen den Muskelspindeln und den Gelenkrezeptoren am Hals einerseits und dem Vestibulariskern und dem Kleinhirn andererseits sehr enge nervale Verschaltungen.

Über die Einflüsse auf die Blickmotorik kann die Funktion des Vestibularapparates klinisch geprüft werden. Nach Abbremsung des zuvor längere Zeit um seine vertikale Achse rotierenden Körpers (Drehstuhl) kommt es wegen der Reizung der horizontalen Bogengänge zu einem postrotatorischen Nystagmus, wobei sich die Augen horizontal *langsam in Drehrichtung* bewegen, um dann *rasch zurückzuschellen*, wobei eine Rechtsrotation zu einem Linksnystagmus führt u. umgekehrt. [Silbernagl. et al. 1988].

**Hinweis:** Das Gleichgewichtsorgan (Labyrinth) reagiert einerseits auf die Körperstellung im Gravitationsfeld und andererseits auf schnelle Translations- und Rotationsbewegungen, während langsame Bewegungen nicht gemeldet werden. Damit wird bei langsamen Bewegungen der Bezugspunkt nicht in objektiven, sondern in subjektiven Koordinaten gewählt (z.B. langsame Bewegungen der Umwelt werden als Eigenbewegung gedeutet; Zug).

### 7.3. Funktion des Kleinhirns



**Laterales Kleinhirn** (Hemisphären). Es ist v.a. an der motorischen Programmierung beteiligt (3). Seine funktionelle Plastizität ermöglicht ausserdem die motorische Adaptation und das Erlernen motorischer Abläufe. Zum Kortex bestehen bidirektionale Verbindungen. **Afferent** ist es mit denjenigen Kortexarealen, die v.a. in die „Vorbereitungsphase“ von Bewegungen involviert sind (parietale präfrontaler und prämotorischer Assoziationskortex, sensomotorischer und visueller Kortex), via **Ponskerne** und Moosfasern (s.u.) verbunden, während es via **untere Olive** und Kletterfasern (s.u.) Afferenzen aus kortikalen und subkortikalen motorischen Zentren erhält. Die **Efferenzen** des lateralen Kleinhirns ziehen v.a. via motorischer Thalamus zum Motokortex. Bei **Läsionen** der Kleinhirnhemisphären ist die Initialisierung, die Koordination und die Beendigung der zielgerichteten Motorik sowie die rasche „Umprogrammierung“ auf entgegengesetzte Bewegungen (Diadochokinese) gestört. Es kommt zum Zittern vor dem Bewegungsziel (**Intentionstremor**), zum „Danebengreifen“ (**Dysmetrie**), zum Nachpendeln beim Bewegungsstopp (**Rückschlagphänomen**) und zur **Adiadochokinese**. Ausserdem ist die Sprache langsam, monoton und verworren (**Dysarthrie**).

#### Kleinhirnbahnen und Kleinhirnfunktionen

Das Kleinhirn ist ein wesentliches Steuerzentrum der Motorik. Es koordiniert Bewegung und Haltung und ist an der Bewegungsprogrammierung beteiligt. Die entwicklungs-geschichtlich älteren Teile des Kleinhirns, das **Archi-** und **Paläozerebellum**, liegen **median**. Sie bestehen aus **Nodus** und **Flocculus** bzw. aus **Pyramide**, **Uvula**, **Paraflocculus** und Teilen des **Lobus anterior**. Auch die **Pars intermedia** kann noch zum medianen Kleinhirn gerechnet werden. Das jüngere, beim Menschen stark entwickelte **Neozerebellum** liegt **lateral**.

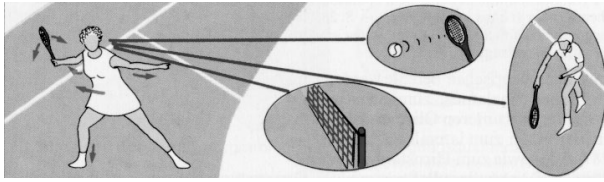
**Medianes Kleinhirn** (1, 2). Es ist in erster Linie an der Steuerung der Halte- und Stützmotorik und an der Blickmotorik beteiligt. Es erhält **Afferenzkopien** spinalen, vestibulären und visuellen Ursprungs sowie **Efferenzkopien** der motorischen Signale für die Skelettmotorik. Die **Ausgänge** des medianen Kleinhirns laufen über die **Nuclei fastigii, globosus et emboliformis** zu den motorischen Zentren von Rückenmark und Hirnstamm sowie zu den Vestibularkernen (**Deitersscher Kern**).

**Läsionen** des medianen Zerebellums haben Gleichgewichts- und blickmotorische Störungen (Pendelnystagmus) sowie Rumpf und Gangataxie zur Folge.

Die efferenten Bahnen der Kleinhirnrinde bestehen aus Neuriten der ca.  $15 \times 10^6$  **Purkinje-Zellen**. Sie wirken **hemmend** auf die nachgeschalteten Kleinhirnkern. Die in der Olive umgeschalteten Afferenzen aus dem Rückenmark enden als **Kletterfasern** an den **modulären Funktionseinheiten** der Kleinhirnrinde (longitudinale Mikrostreifen). Über ihre (mehrfach) erregenden Synapsen führen sie zu einer **Vertiefung der hemmenden Wirkung der Purkinje-Zellen**. Alle übrigen Afferenzen zum Kleinhirn enden als **Moosfasern**. Sie können über die Erregung der zahlreichen **Körnerzellen** und deren **Parallelfasern** die Hemmwirkung der Purkinje-Zelle entweder vertiefen oder über hemmende Zwischenzellen (**Golgi-Zellen**) enthemmen (**Desinhibierung**). Eine direkte Desinhibierung kann durch die **Stern-** und **Korbzellen** erfolgen. Dabei kommt es gleichzeitig zur **Konvergenz** (ca.  $10^5$  Parallelfasern  $\rightarrow$  1 Purkinje-Zelle) und zur **Divergenz** der Signalkette (Kollateralen einer Kletterfaser  $\rightarrow$  10-15 Purkinjezellen). [Silbernagl et al., 1988]



### Ziel- und Stützmotorik



Die Blickmotorik „behält“ den Ball „im Auge“, die Sehirinde analysiert Flugbahn und Geschwindigkeit des Balles. Die „assoziative“ Hirnrinde entwirft die Bewegung „Zurückschlagen“, wobei Ball, Netz, gegnerisches Feld und Spielpartnerstellung berücksichtigt und u.a. der Rückstoss beim Schlagen des Balles wieder mit Stützbewegungen ausgeglichen werden müssen.

Die Integrations- und Koordinationsleistung des Kleinhirns in Zusammenarbeit mit den anderen motorischen Zentren und den Sinnesorganen soll am Beispiel einer Tennisspielerin gezeigt werden: Während der Tennispartner den Ball aufschlägt, wird der Körper in Richtung Ballziel bewegt (Zielmotorik), wobei eine adäquate Stützung (rechtes Bein) und Balance (linker Arm) erhalten bleiben müssen (Stützmotorik).

Mit Bewegungsprogrammen von Kleinhirn und Basalganglien führt schliesslich der motosensorische Kortex die gezielte Schlagbewegung aus, wobei der Ball nicht nur getroffen und ins gegnerische Spielfeld geschlagen, sondern meist auch durch einen tangentialen Schlag („Schneiden“) in Rotation versetzt wird (erlernte, schnelle Zielmotorik). [Silbernagl. et al., 1988].

## 7.4. Psychotoxikologie

### 7.4.1. Störungen des vegetativen Nervensystems

#### Somatische efferente Nerven

Störungen	Beispiel
Pupille .....	verlangsamte Reaktion
Schweissdrüse .....	trockene Haut
Durchblutung .....	Schwindel beim Aufstehen

#### Vegetative efferente Nerven

Störungen	Beispiel
Herzrhythmus .....	schneller Ruhepuls
Verdauungsapparat .....	schlaffe Magenwände, Verdauungsstörung
Harnwege .....	Blasenentleerungsstörung
Sexualorgane .....	Erektionsstörung

#### Somatische afferente Nerven

Störungen	Beispiel
Herz .....	kein Schmerz bei Angina Pectoris
Verdauungsapparat .....	Stuhlinkontinenz
Harnwege .....	fehlendes Gefühl für Blasenfüllung

### 7.4.2. Toxische Polyneuropathie

(Polyneuropathie allgemein sehr häufig, toxische Ursache selten).

#### Efferente Nerven

Störungen	Beispiel
motorische Nerven .....	Muskelschwäche bis zur Lähmung

#### Afferente Nerven

Störungen	Beispiel
schnell leitende dickbemarktete Nervenfasern .....	Kribbeln, Ameisenlaufen, Schwellgefühl
langsam leitende marklose Nervenfasern .....	Wärme-/Kältesinn gestört, Schmerzen

### 7.4.3. Störungen des Zentralnervensystems

#### Symptome einer akuten Intoxikation (Vergiftung)

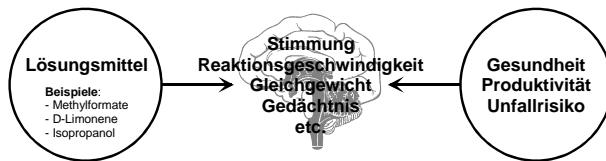
Störungen	Beispiel
Grosshirn .....	Bewusstseinstörung, Krampfanfälle
Stammhirn .....	Doppelbilder, Tremor
Kleinhirn .....	Schwindel

### 7.4.4. Zeichen einer chronischen Vergiftung

#### Somatische afferente Nerven

Störungen	Beispiel
Grosshirn .....	Gestörtes Kurzzeitgedächtnis, Konzentrationsmangel
Stammhirn .....	Parkinson
Kleinhirn .....	Koordinationsstörungen

## 7.4.5. Lösungsmittlexposition und Wirkungen auf das Nervensystem



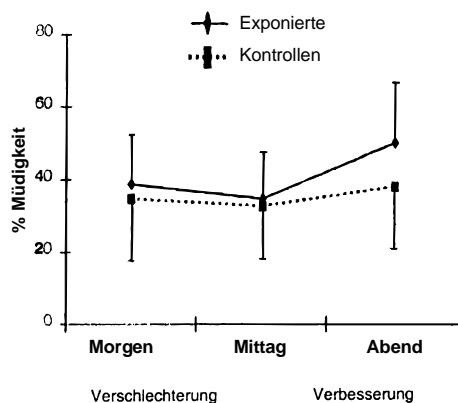
### Versuche in Expositions-kammer

#### Beispiel eines Experiments

- Vergleich von 20 exponierten Studenten mit gleich zusammengesetzter Kontrollgruppe
- Während 8 Stunden Exposition im Bereich des MAK-Wertes (Maximale Arbeitsplatzkonzentration)
- Physische Belastung auf dem Fahrradergometer (2.5 Stunden mit 50 Watt) um die normale Arbeitsbelastung zu simulieren
- Psychomentele Leistungstests zu Beginn, am Mittag und am Ende

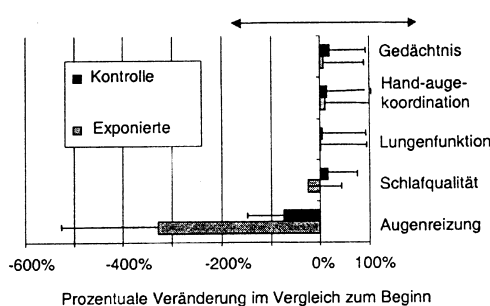
#### Tests

- Stimmungslage
- Psychomentele Leistung (Reaktionszeit, Stroop, Wiener Determinationstest, Zahlengedächtnis, „Kombitest“, „Multitest“, Gleichgewicht)
- Physiologische Veränderungen (Puls, Muskelspannung, Blutdruck)
- Sehleistung (Kontrastsehen)
- Lungenfunktion (FVC, FEV, PEF, MEF)



#### Beispiel 1 für Ergebnisse

Müdigkeit (POMS) nach einer 8-stündigen Methylformiatexposition



#### Beispiel 2 für Ergebnisse

Übersicht zu Wirkungen einer 8-stündigen Limonenexposition

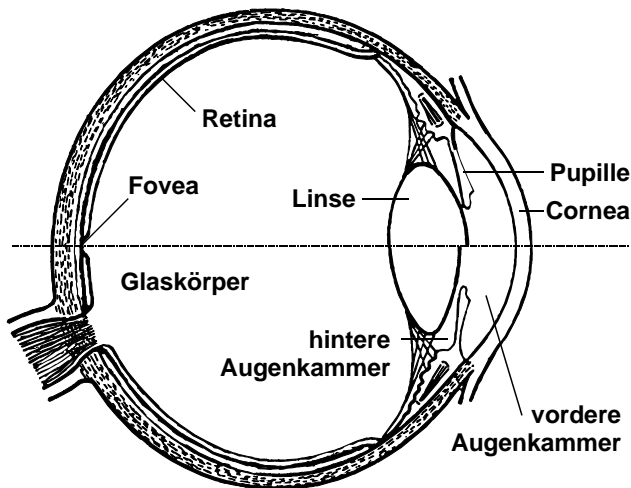
## 7.5. Literatur

- Schmidt & Thews: Physiologie des Menschen; Kap. 12.1.
- Schmidt R.F.: Neuro- und Sinnesphysiologie; Kap. 12.
- Rohen J.W. (1985): Funktionelle anatomie des Nervensystems. Ein kurzgefasstes Lehrbuch nach funktionellen Gesichtspunkten für Studierende und Ärzte. 4. Auflage, Schattauer, Stuttgart.
- Silbernagel S., Despopoulos A. (1988): Taschenatlas der Physiologie. 4. Aufl. Thieme, Stuttgart. Seiten 286, 287, 298 und 299.

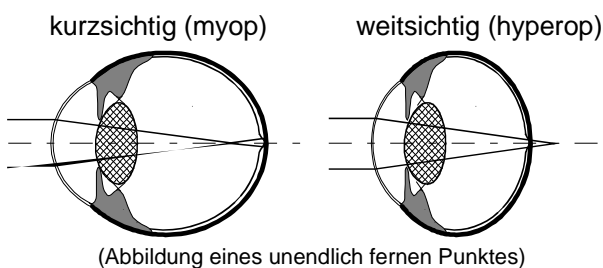
## 8. Sehen

Sehen ermöglicht dem Menschen auch aus weiten Distanzen Information aufzunehmen. Mit ca.  $10^6$  Nervenfasern im optischen Nerven ist das Auge das Sensororgan mit der grössten Kapazität von allen Sensorsystemen.

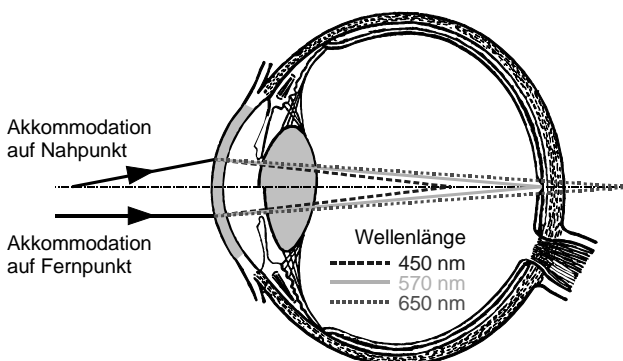
### 8.1. Aufbau und Funktion des Auges



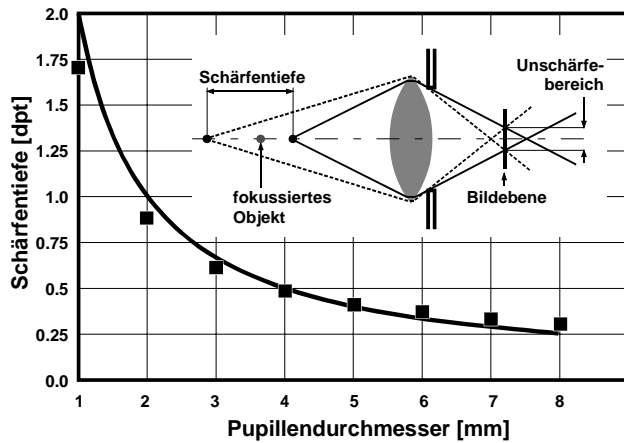
**Hornhaut (Cornea):** Sie ist die Begrenzung nach aussen. Ort der grössten Brechkraft im System Auge. **Vordere Augenkammer:** Sie wird von der Hornhaut und der vorderen Linsenfläche nebst Pupille begrenzt. Die Kammer ist mit dem Kammerwasser gefüllt. Dieses wird ständig in der **hinteren Augenkammer** produziert und im vorderen Kammerwinkel resorbiert. Ein Überwiegen der Produktion bzw. eine verminderte Resorption führt zu Augenhochdruck (Folge: **grüner Star, Glaukom**). Der gallertartige **Glaskörper** dient der Formgebung des Auges und als mechanischer Schutzpuffer gegen Erschütterungen.



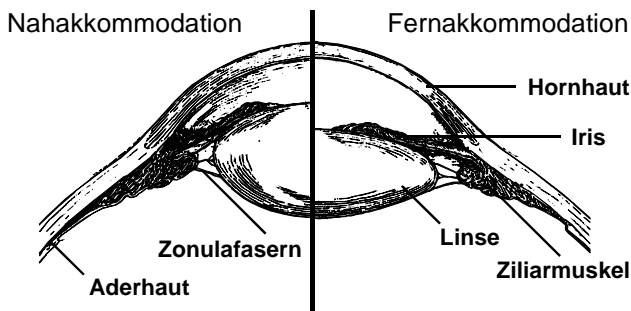
**Fehlsichtigkeiten:** Kann das Auge einen unendlich fernen Punkt nicht fokussieren, weist es eine zu starke Brechkraft auf und man spricht von **Kurzsichtigkeit (Myopie)**. Sie kann mit konkaven Linsen korrigiert werden. Umgekehrt müssen **weitsichtige** Personen (**Hyperopie**) bei Blick auf einen unendlich fernen Punkt in die Nähe akkomodieren; Korrektur mit konvexer Linse. Eine weitere fehlsichtigkeit ist der **Astigmatismus** (Hornhautverkrümmung).



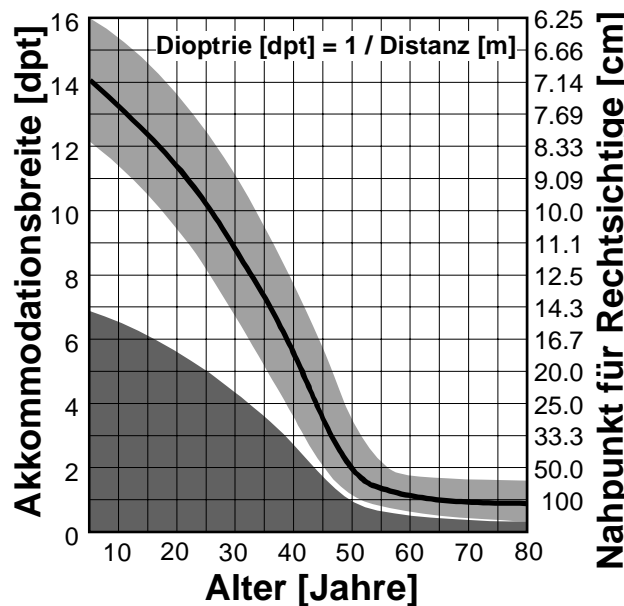
An der Hornhaut findet die wesentliche Brechung im optischen System Auge statt. Grundsätzlich gibt es auf der Netzhaut kein scharfes Bild, weil die Optik grosse **sphärische und chromatische Fehler (Aberrationen)** aufweist. Eine Korrektur erfolgt durch nachfolgende Wahrnehmungsprozesse (Konstanzmechanismen). Daneben überlagert sich u.U. dem retinalen Bild ein Anteil **Streulicht**, der durch Fehler im Auge entsteht.



**Iris:** Die Iris bildet die Pupillenöffnung. Die Pupille regelt die retinale Beleuchtungsstärke. Bei viel Licht und somit kleiner Pupille wird die sphärische Aberration verringert und dadurch die Abbildungsgüte verbessert. Die mit kleiner Pupille vergrößerte Schärfentiefe bewirkt eine grössere Toleranz bezüglich ungenauer Akkommodation.



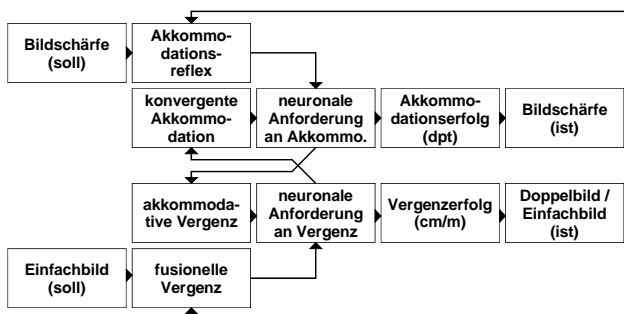
**Linse:** Zwiebelschalenförmiger Aufbau. Im Laufe des Lebens verändert sich die Durchlässigkeit, sie wird trübe (grauer Star, Katarakt). Die Linse ist mit einer elastischen Kapsel und einem weichen Kern in der Lage, ihre Form zu ändern und damit die Brechkraft (Akkommodation). Sie ist mit dünnen Fäden (Zonulafasern) im ringförmigen Ziliarmuskel aufgehängt.



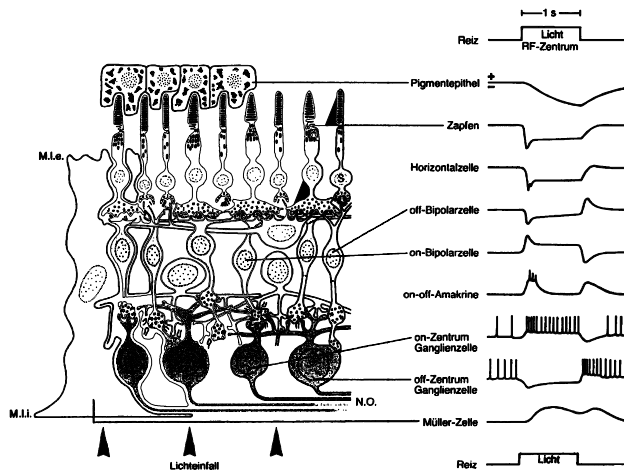
**Alterssichtigkeit (Presbyopie):** Das Akkommodationsvermögen (Akko.-Breite, Akko.-Geschwindigkeit) ist die Differenz zwischen dem Nahpunkt mit maximaler Akko.-Anstrengung und der des Fernpunktes mit maximaler Entspannung des „Akko.-Muskels“ (Ziliarkörper). Distanzen werden dazu in  $1/m := \text{dpt}$  (Dioptrie) angegeben, da die Akko.-Anstrengung etwa linear zu den Dioptrie-Werten verläuft und nicht zu Meter-Werten.

Bei etwa dem halben Maximum der Akko.-Breite kann längere Zeit ermüdungsfrei akkommodiert werden. Die Akko.-Bbreite ist unabhängig von einer etwaigen Kurz- oder Weitsichtigkeit.

Ab ca. 40 Jahren muss für Naharbeiten eine Altersbrille getragen werden. Dies merken besonders frühzeitig schwach Weitsichtige, die vorher nicht auf eine Brille angewiesen waren.

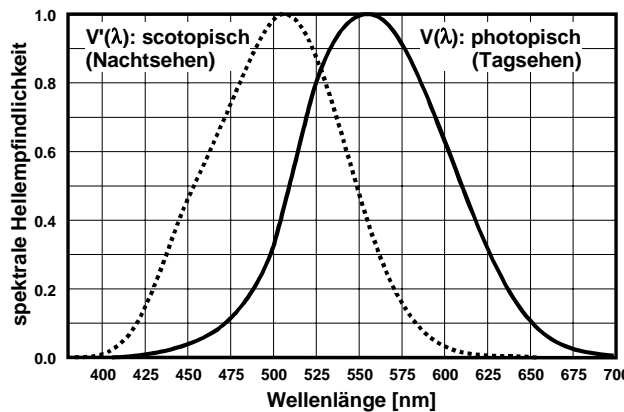


**Nahreflex:** Bei Wechsel der Sehentfernung ändert sich nicht allein die Brechkraft der Augenlinse. Gleichzeitig kommt es zu einer Ausrichtung der Augenachsen (Vergenz). Vergenz und Akkommodation sind fest miteinander gekoppelt. Zusätzlich ändert sich die Pupillenweite (Pupillennahreflex). Die Pupille wird beim Blick in die Nähe enger.

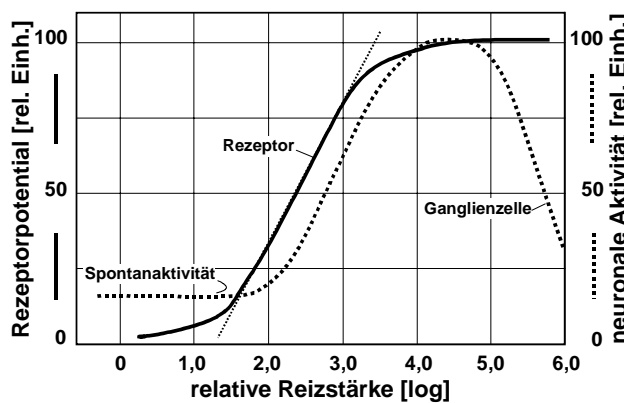


**Netzhaut (Retina):** Das Licht durchläuft erst die oberen Netzhautschichten (Ganglienzellen, Bipolarzellen, Horizontalzellen, Amakrinzellen) bevor es auf die Rezeptoren (Zapfen, Stäbchen) trifft (inverser Aufbau der Netzhaut). Die Zapfen sind am kleinsten und am dichtesten gepackt an der Stelle des schärfsten Sehens, der Fovea. Beim blinden Fleck (Papille) verlässt der Sehnerv das Auge. Es ist dort für Licht unempfindlich. Rechts sind die Aktionspotentiale der verschiedenen Zellen dargestellt.

## 8.2. Helligkeit und Kontrast

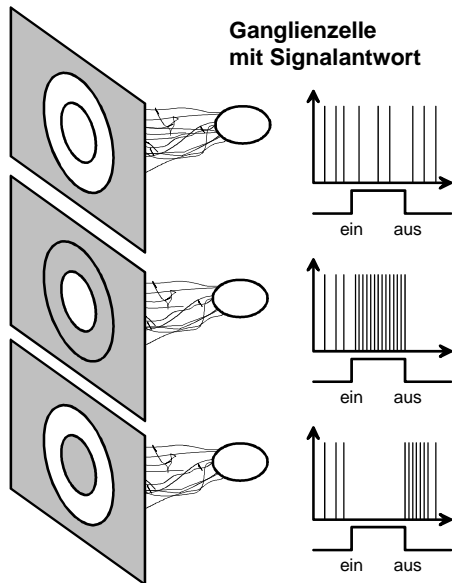


**Spektrale Empfindlichkeit des Auges:** Da sich die Empfindlichkeit im Dunkelsehen (scotopisch) von dem bei Tagsehen (photopisch) deutlich unterscheidet arbeitet man im allgemeinen mit zwei verschiedenen spektralen Empfindlichkeitskurven. Grundsätzlich müssen für den Übergangsbereich des Dämmerungssehens (mesopisch) eigene Kurven definiert werden. Physikalische Grössen der Lichtleistung werden mittels der spektralen Empfindlichkeitskurve  $V(\lambda)$  in physiologisch bewertete photometrische Einheiten umgerechnet (z.B. Helligkeit:  $cd/m^2$ ; Beleuchtungsstärke: Lux).

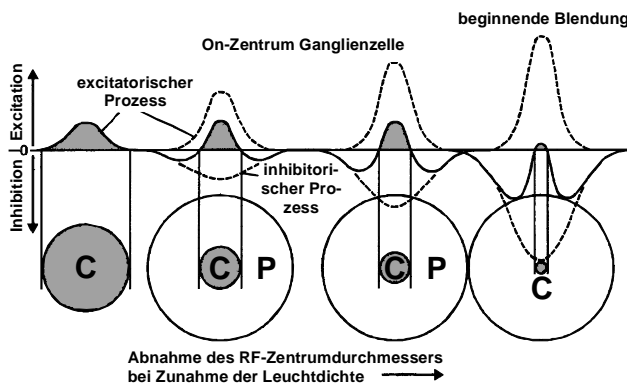


**Abhängigkeit der Aktivierung einer retinalen On-Zentrum Ganglienzelle von der Reizstärke:** Trifft ein adäquater Reiz auf eine Sinneszelle, so wird dort eine Potentialänderung, meist eine Depolarisation, ausgelöst. Man nennt sie Rezeptor- oder Generatorpotential. Sie ist lokal, abstuftbar und wächst mit zunehmender Reizstärke. Wenn das Generatorpotential die Schwelle erreicht, löst es am wegführenden Nerven ein Aktionspotential aus. Je stärker der Reiz auf den Rezeptor wirkt, desto grösser wird auch die Frequenz der Aktionspotentiale, die vom Rezeptor ausgelöst und über die afferente Nervenfasern weitergeleitet werden. Viele Sinnes- und Nervenzellen können Reizintensitäten von mehreren Zehnerpotenzen Intensitätsunterschied verarbeiten. Zwischen Sensorpotential (Generatorpotential) und physikalischer Reizintensität besteht in einem mittleren Intensitätsbereich eine logarithmisch-lineare Beziehung. Dasselbe gilt auch für das pulskodierte Signal im Nerven.

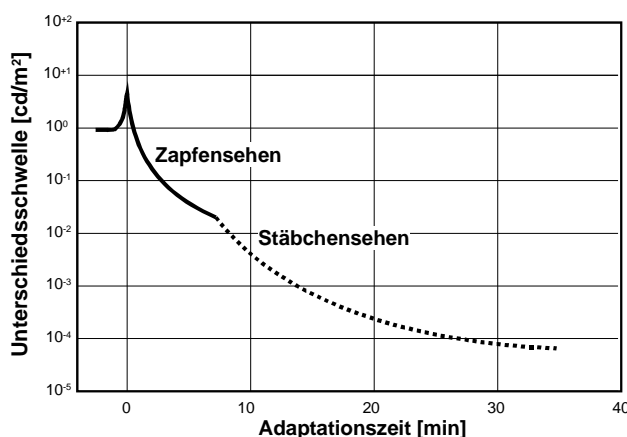
**Netzhautausschnitt mit rezeptivem Feld**



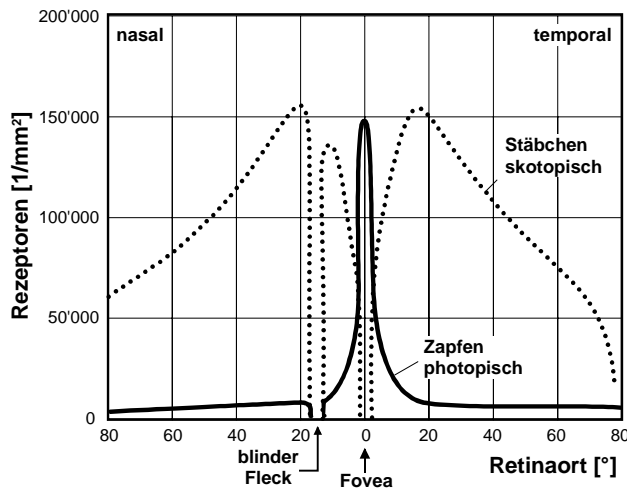
Funktionelle Organisation rezeptiver Felder der Ganglienzellen in der Säugetiernetzhaut. Zur Analyse der rezeptiven Felder (RF) wird Licht (hell markiert) entweder in das RF-Zentrum (Mitte) oder in die Peripherie projiziert (unten). Lichtreizung bewirkt bei den On-Zentrum-Neuronen und den Off-Zentrum-Neuronen verschiedene Reaktionen. Das dargestellte On-Zentrum-Neuron wird bei Belichtung im Zentrum seines RF erregt und bei Belichtung der Feldperipherie gehemmt. Werden beide Zonen belichtet, erfolgt keine Änderung der Entladungsrates (oben). Die Struktur der rezeptiven Felder mit einem Antagonismus zwischen Zentrum und Umfeld bietet eine Erklärungsmöglichkeit für Wahrnehmungsphänomene wie die Mach-Bänder, die Her-mannsche Gittertäuschung oder die Springerlinien.



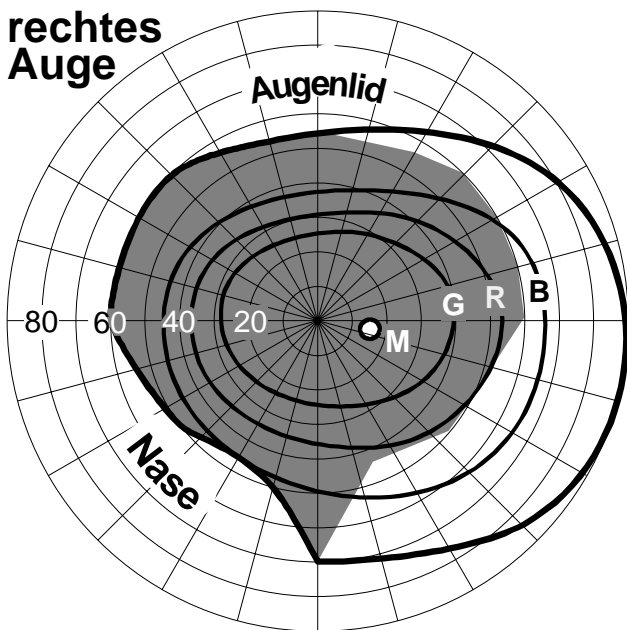
Änderung der Organisation der rezeptiven Felder bei Änderung der Leuchtdichte. Das RF-Zentrum wird relativ um so kleiner, je heller die Adaptationsleuchtdichte ist. Im dunkeladaptierten Zustand ist die antagonistische Organisation des RF aufgehoben. Lichtreize bewirken dann im ganzen RF eine Erregung. Bei optimaler Helladaptation ist das RF-Zentrum am kleinsten und daher die Sehschärfe am grössten.



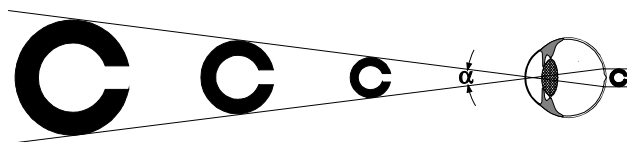
Änderung der Schwellenreizstärke bei Dunkeladaptation. Auf der Ordinate ist die relative Reizstärke (Leuchtdichte) eines gerade wahrgenommenen Lichtreizes in logarithmischen Einheiten aufgetragen. Die nach links verlängerte gepunktete Linie stellt die Adaptationskurve eines total farbenblinden Menschen (Stäbchenmonochromat) dar. Durch rotes Licht (ausgezogene Linie) kann die nach rechts verlängerte Adaptationskurve der Zapfen gemessen werden. Im Gegensatz zur langsamen Dunkeladaptation verläuft die Helladaptation deutlich schneller, nämlich in wenigen Sekunden. Gleichzeitig mit der Dunkeladaptation erfolgt eine Verschiebung der spektralen Empfindlichkeit ins Blaue (vgl. Kurven spektraler Empfindlichkeiten). Werden nur einzelne Bereiche der Netzhaut adaptiert spricht man von lokaler Adaptation (→ Nachbilder). Eine weitere Anpassung an kleine Lichtintensitäten ist die vergrösserte Integrationszeit des Auges („Belichtungszeit“). Versuch: Pulfrich-Pendel



**Retinale Sensorverteilung:** Die Verteilung der Zapfen auf der Netzhaut („Hell“-Sehen, photopisches Sehen) und der Stäbchen („Dunkel“-Sehen, skotopisches Sehen). Die Verteilung der Rezeptoren bestimmt den retinalen Sehschärfeverlauf wie auch die nervöse Konvergenz in verschiedenen Retinaarealen. Sie wächst mit zunehmender Entfernung von der Fovea (Durchmesser der Rezeptoren, rezeptive Feldgrösse).

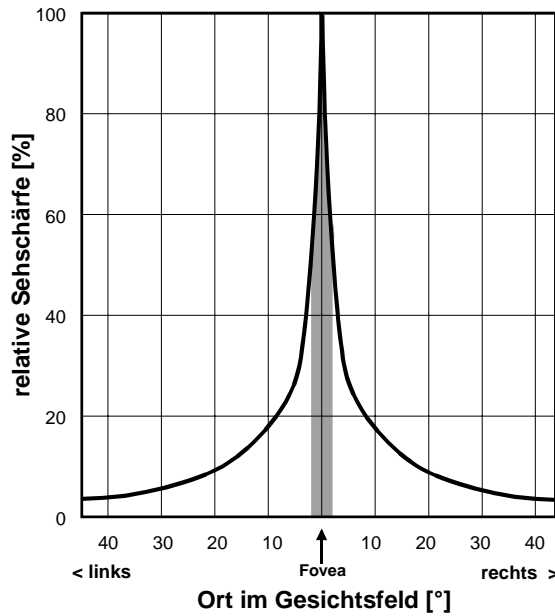


**Gesichtsfeld des rechten Auges:** Das Gesichtsfeld ist jenes Gebiet, welches mit einem Blick, ohne Kopf- und Augenbewegungen, mehr oder weniger scharf wahrgenommen wird. Es ist trotz fehlender Augenbewegung grösser als das Blickfeld (vgl. Kap. 8.4), da auch die unscharfen, nicht in der Blickrichtung liegenden Bereiche dazugehören. Grau binokulares Deckfeld; M: blinder Fleck; G: Aussengrenze der Grünwahrnehmung; R: Aussengrenze der Rotwahrnehmung; B: Aussengrenze der Blauwahrnehmung; äusserste Kurve: Aussengrenze der Helligkeitswahrnehmung. Weiter aussen sind noch Rezeptoren, welche der Bewegungsdetektion sowie der Aufmerksamkeitserregung dienen.



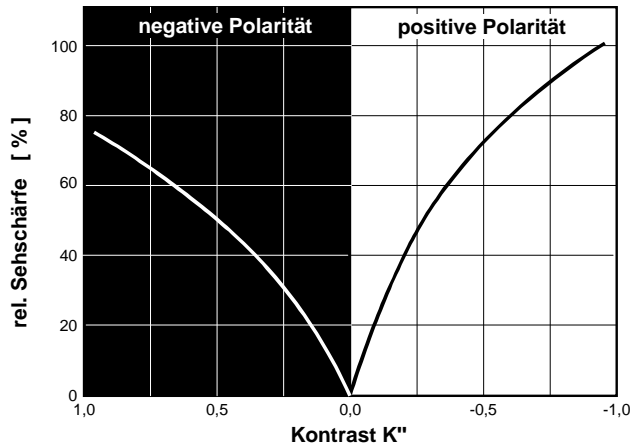
**Definition des Seh winkels und der Sehschärfe:** Das Auflösungsvermögen des Auges (Visus) wird als Kehrwert des Seh winkels (in Bogenminuten) des kleinsten erkannten Sehobjektdetails bestimmt. Der Visus 1 ergibt sich z.B. für „Landolt-Ringe“ = C mit 5' Durchmesser (Winkel  $\alpha$ ; ungefähr 7,5 mm in 5 m Entfernung) und einer Öffnung von 1'. Grössere Fehlsichtigkeiten (Myopie, Hyperopie, Astigmatismus) sind häufig mit einer Visusminderung verbunden.



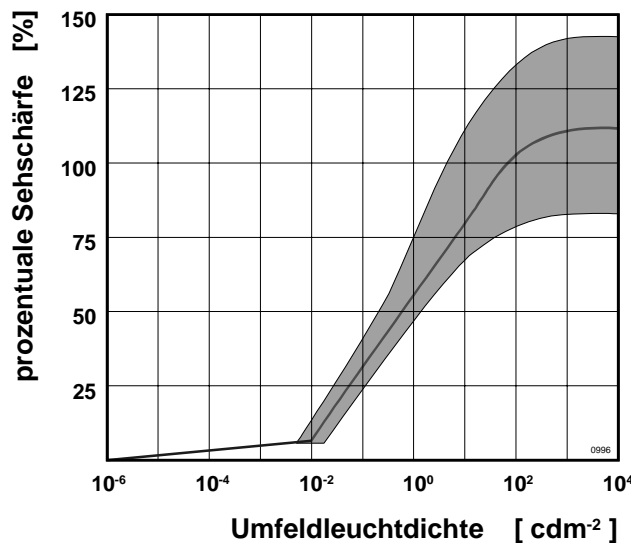


Retinale Sehschärfeverteilung für photopisches Sehen: Verteilung der Sehschärfe bei photopischem Sehen. Die Lücke des blinden Flecks wird auch monokular nicht gesehen; denn dort wo keine Information vorhanden ist, kann auch nicht ein Schwarzes Loch gesehen werden. Aber die Sehschärfe kann dort natürlich nicht bestimmt werden. Binokular wird die Lücke vom jeweils anderen Auge ausgefüllt. Bereits zum Rand der Fovea hin fällt der Visus steil auf die Hälfte des zentralen Wertes ab. Die zentrale Sehschärfe ist also nur ein operationaler Wert für die Sehfähigkeit der Netzhaut.

$$K = \frac{L_O}{L_B}; \quad K' = \frac{L_O - L_B}{L_B}; \quad K'' = \frac{L_O - L_B}{L_O + L_B}$$

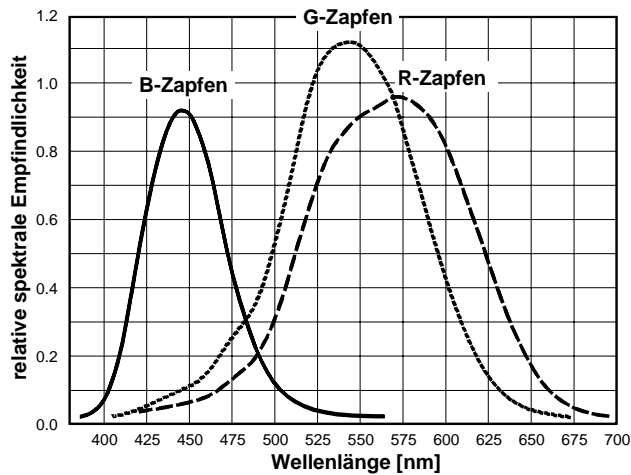


Der Kontrast beeinflusst die Sehschärfe sehr deutlich. Für den Kontrast sind folgende Definitionen gebräuchlich ( $L_O$  = Leuchtdichte des Sehobjektes;  $L_B$  = Leuchtdichte des Hintergrundes):  $K$  = photometrischer Kontrast,  $K'$  = relativer Unterschiedskontrast und  $K''$  = Modulationskontrast. Neben dem Kontrast ist wegen der starken Empfindlichkeit des Auges für lokale relative Unterschiedskontraste auch die Schärfe der Sehobjekte von Bedeutung. Durch unterschiedliche lokale Adaptation und der damit verbundenen Unterschiede im Auflösungsvermögen, beeinflusst auch die Polarität des Sehobjekts die Sehschärfe.

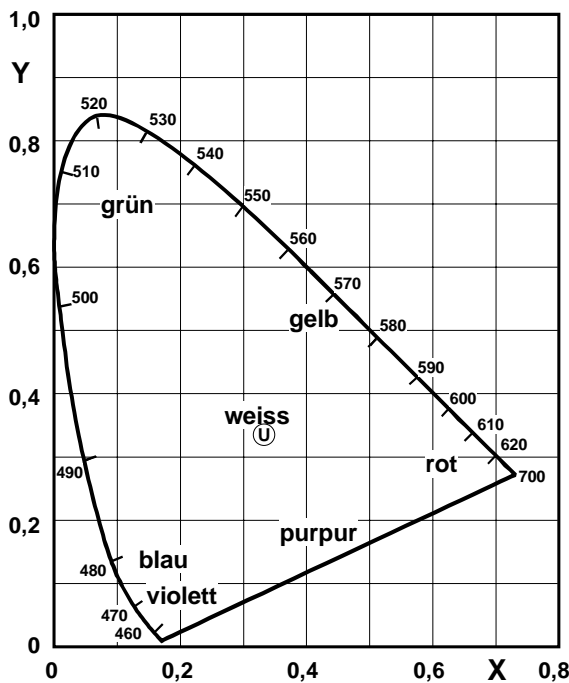


Sehschärfe als Funktion der Umgebungshelligkeit: Die foveale Sehschärfe ändert sich mit der mittleren Helligkeit im Gesichtsfeld in einen mittleren Bereich steigt sie linear mit dem Logarithmus der Leuchtdichte, einem Mass für die Helligkeit. Bei etwa 100 cd/m<sup>2</sup> wird ein Maximum erreicht. 100 cd/m<sup>2</sup> entsprechen etwa der Helligkeit, die im Büro auf weissem Papier erreicht werden.

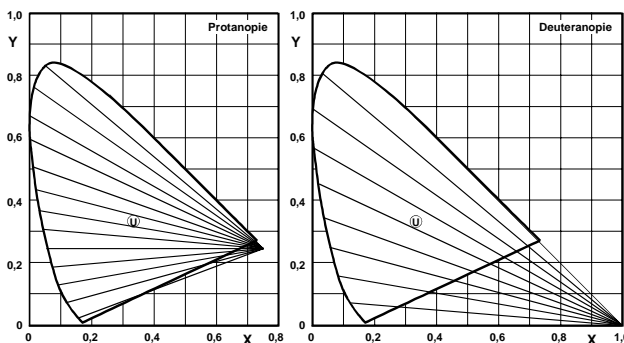
### 8.3. Farbsehen



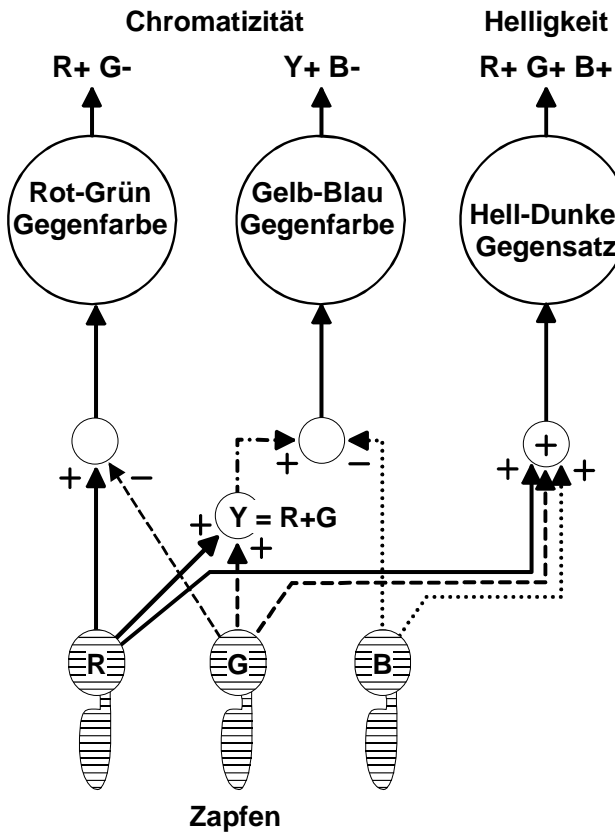
Spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfentypen: (nach Vos und Walraven). Die Zapfentypen B:G:R verteilen sich in der Fovea im Verhältnis 1:17:34. Schon H.v.Helmholtz postulierte auf Grund farbmetrischer Untersuchungen eine Dreifarbentheorie. Erwähnt werden soll auch eine natürliche Blau-Farbsehschwäche (s.u.) der zentralen Fovea, die im Hinblick auf die dort verminderte Dichte der B-Zapfen plausibel ist.



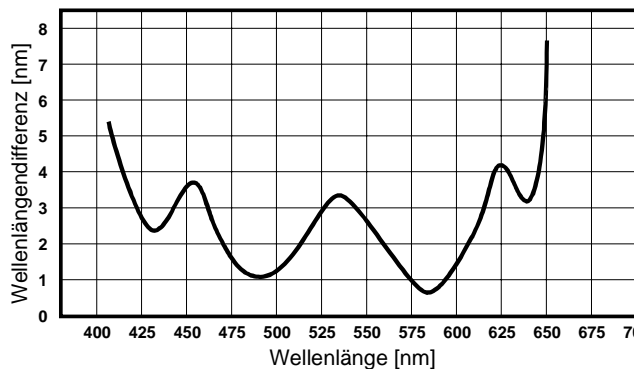
Farbsysteme: Für die Klassifizierung von Farben wurden sehr viele verschiedene Koordinatensysteme entwickelt. Hier wird exemplarisch die CIE-Lxy Normfarbtafel vorgestellt. Auf der Randkurve des Farbdreiecks liegen die reinen Spektralfarben rechts mit rot beginnend und gegen den Uhrzeigersinn über Orange, Gelb, Grün, Türkis zu Blau verlaufend. Bei (0.33, 0.33) liegt der Unbuntpunkt. Die Verbindung zwischen Rot und Blau kennzeichnet das Gebiet der Purpurfarben. Dargestellt ist die Helligkeitsebene mit der grössten Ausdehnung. Für grössere Helligkeit wird es kleiner wie auch für kleinere. Das Farbdreieck basiert auf einer bestimmten Art der Erstellung der Farben. In Zylinderkoordinaten mit Ursprung beim Unbuntpunkt entspricht der Winkel dem Bunton, der Abstand zum Ursprung der Sättigung und die Höhe über oder unter der Ebene der Helligkeit.



Farbfehlsichtigkeiten: Dargestellt sind Verwechslungsgeraden im Farbdreieck für Rot-Grün-Fehlsichtigkeiten. Diese sind am häufigsten. Sie betreffen den roten Farbkanal (Protanopie, Protanomalie) bzw. den grünen (Deuteranopie, Deuteranomalie). Selten kommt auch eine Blau-Gelb Verwechslung vor. Farbfehlsichtigkeiten sind im Regelfall angeboren. Da die Veranlagung rezessiv mit dem Geschlechtschromosom vererbt wird, sind bevorzugt Männer betroffen (8%). Erworbene Farbfehlsichtigkeiten entsprechen zumeist dem Blau-Gelb Typ. Daneben gibt es zudem die Farbamblyopie, bei der bei längerer Betrachtung einer Farbe Unsicherheiten auftreten bzw. das Auflösungsvermögen für Farben vermindert ist.



Gegenfarbentheorie: Im Widerspruch zu Helmholtz entwarf Hering eine Vierfarbentheorie der Farbwahrnehmung: Es gibt kein grünliches Rot und kein bläuliches Gelb. Daher müssen vier Grundfarben existieren. Wird auf eine Farbe adaptiert erscheint danach die Komplementärfarbe. Wie das Bild zeigt, lässt sich mit einem modernen physiologischen Farbmodell der vermeintliche Widerspruch auflösen. In der Eingangsstufe des Farbsystems werden Farben den drei Zapfentypen nach drei Grundfarben kodiert. Durch Mischung (Addition) entsteht auf einer Zwischenebene Gelb. Subtraktion ergibt in der zentralen Ebene des visuellen Kortex Differenzkanäle (Rot-Grün, Blau-Gelb, Hell-Dunkel).

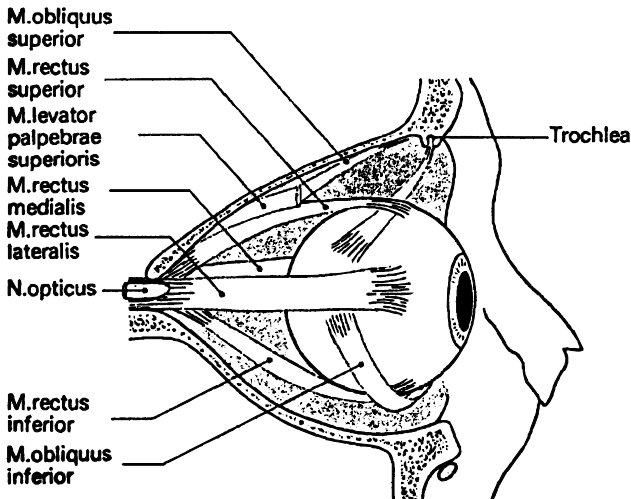


Farbtondiskrimination ( $\lambda - \Delta\lambda$  - Kurve): Bei den Wellenlängen um 480 nm und 575 nm ist das Auge für Farbdiskrimination am empfindlichsten. An diesen Stellen werden die Ganglienzellen wegen des Farbantagonismus am wenigsten stark gereizt und sind daher gemäss der Beziehung von Weber empfindlich gegenüber Abweichungen vom antagonistischen Gleichgewicht. Die Sicherheit der Farberkennung vergrössert sich mit der Helligkeit und der Grösse der farbigen Objekte.

## 8.4. Bewegungssehen, Flimmerempfindlichkeit

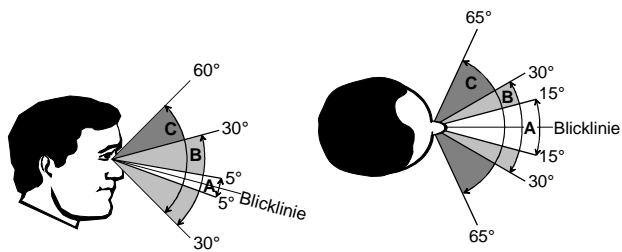
Im Zusammenhang mit Bewegungssehen werden folgende Stichworte diskutiert:

- Peripheres Gesichtsfeld
- Mikrosakkaden: vgl. stabilisierte Netzhautbilder, Nachbilder
- Grunderregung der bewegungsempfindlichen Zellen (wanderndes Licht)
- Adaptation: Wasserfalleffekt. Versuch: rotierende Spirale.
- Scheinbare Bewegung: Flimmerverschmelzungsfrequenz, Kinofilm

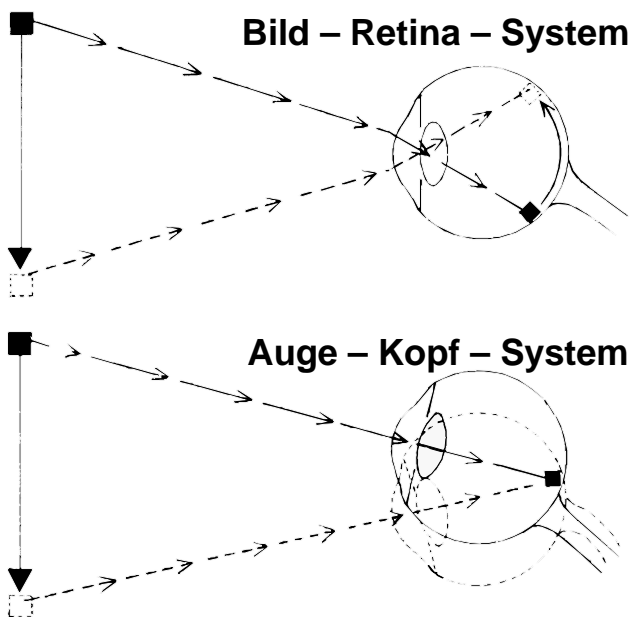


Bewegungsapparat des Auges: Lage der äusseren Augenmuskeln und des Auges in der Orbita (schematisiert).

Listingsches Gesetz: Jedes Auge wird durch sechs Muskeln bewegt. Diese bewirken Drehungen nach oben und unten, nach links und rechts, sowie Drehungen um die Blicklinie als Drehachse. Die letztere oblique Drehmöglichkeit ist notwendig, weil Drehungen im 3-dimensionalen Raum nicht austauschbar sind. Das heisst, ohne diese Drehmöglichkeit würde eine Drehung erst nach links und dann nach oben eine andere Augenstellung ergeben als eine Drehung erst nach oben und dann nach links. Die Drehkorrektur um die Blicklinie erfolgt so, als ob das Auge sich direkt mit einer einzigen Drehung nach links-oben bewegt hätte.



Das Blickfeld ist derjenige Raumbereich, in dem ein Mensch bezogen auf seine jeweilige Körperhaltung ein Sehobjekt mit dem Blick, d.h., mit den Augen scharf fixieren kann. Es wird durch die Augenbewegung begrenzt. Wird der erkennbare Raumbereich durch zusätzliche Kopf- und Rumpfbewegungen vergrößert, spricht man vom erweiterten Blickfeld.



Das Sehsystem unterscheidet, ob die Bewegung eines Lichtpunktes auf der Netzhaut auf eine Eigenbewegung des Auges oder die Bewegung des Lichtpunktes im Raum zurückzuführen ist (Richtungskonstanz). dafür stehen zwei Signale zur Verfügung: Beim Bild-Retina-System sind es Bewegungsdetektoren in der Netzhaut, beim Auge-Kopf-System Informationen über die Augenbewegung.

Inflow-Theorie: Die afferenten Signale aus der Netzhaut und der Augenmuskulatur werden miteinander verglichen (Ch. Sherrington).

Outflow-Theorie: Das afferente Signal aus der Netzhaut wird mit dem efferenten Signal zur Augenmuskulatur verglichen (H.v.Helmholtz). Diese Theorie stimmt mit den experimentellen Befunden am besten überein: Es entsteht der stark Eindruck einer bewegten Umwelt, wenn versuchsweise ein vorübergehend gelähmtes Auge willentlich bewegt werden soll.

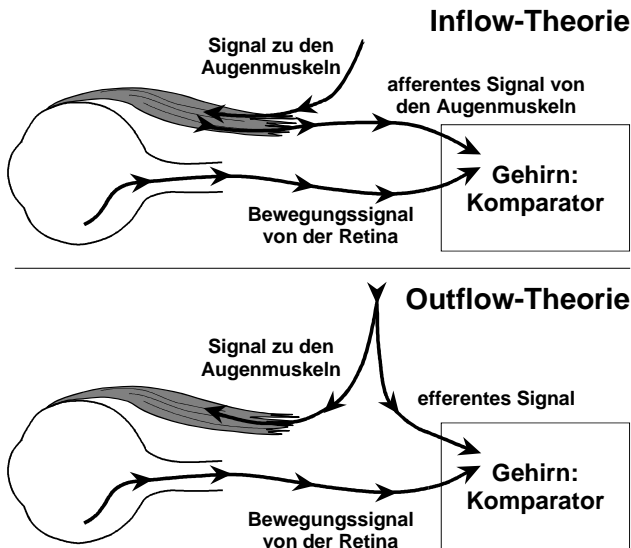
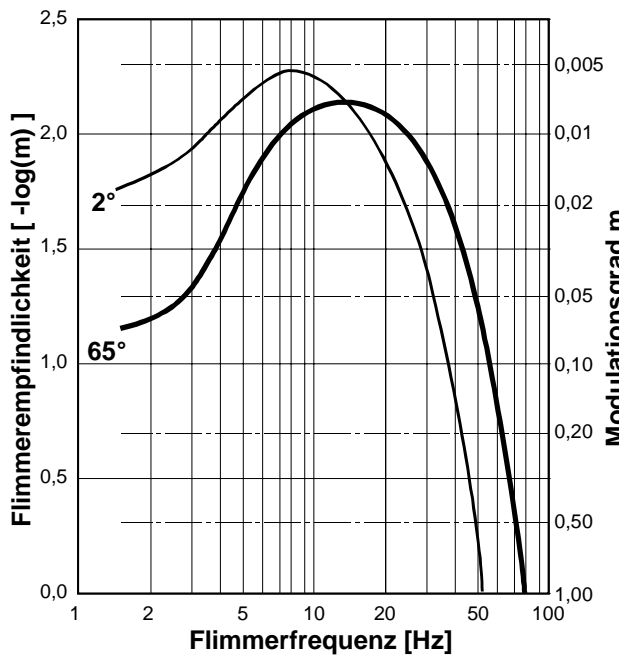
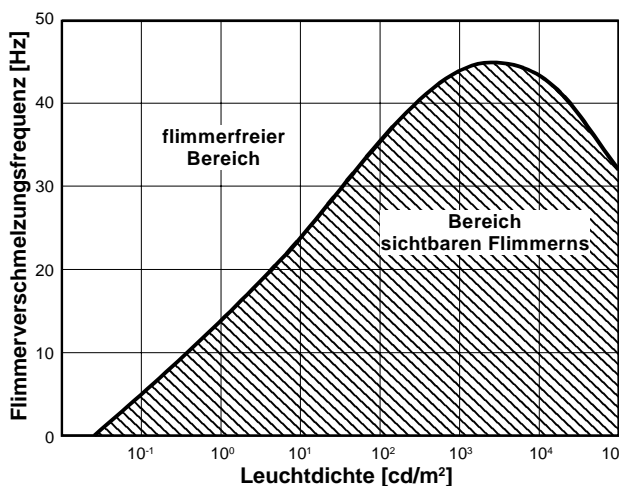


		Bild – Retina – System	
		ja	nein
Auge – Kopf – System	ohne Drücken	Umwelt steht trotz Augenbewegung	Nachbild scheint bewegt <i>mit Delay!</i>
	mit Fingerdruck	Umwelt scheint bewegt	Nachbild steht, trotz Fingerdruck

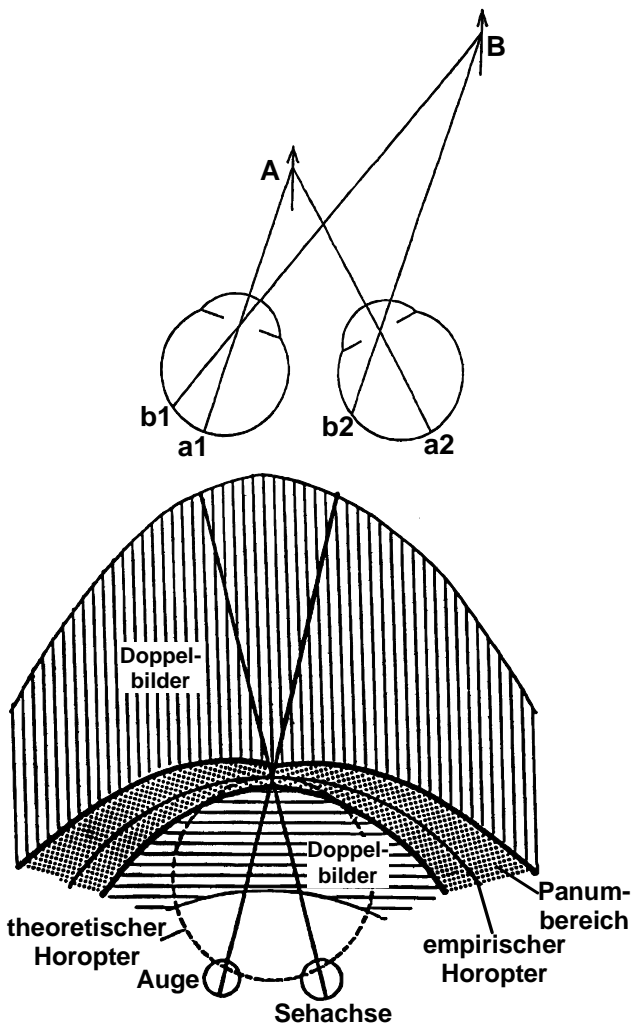


Flimmerempfindlichkeit des Auges für verschiedene Frequenzen: Oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz (FVF) nimmt das Auge Oszillationen nicht mehr wahr. Es entsteht der Eindruck konstanter Helligkeit. Die FVF hängt vom Modulationsgrad (Oszillationsgrad) und der Objektgröße ab. Je grösser die Empfindlichkeit des Auges bei einer Frequenz bzgl. Flimmern ist, um so kleiner ist der Modulationsgrad, der gerade wahrnehmbares Flimmern hervorruft. Das Maximum der Flimmerempfindlichkeit (reziproker Modulationsgrad) liegt bei etwa 20 Hz. Die FVF ist im seitlichen Gesichtsfeld (Peripherie der Netzhaut) höher als im Fixationszentrum (Fovea).



Einfluss der Leuchtdichte (Helligkeit) auf die Flimmerverschmelzungsfrequenz: Die FVF steigt linear mit dem Logarithmus der Leuchtdichte. Das zeitliche Auflösungsvermögen ist mit der Sehschärfe korreliert. Das Bewegungssehen hat eine deutlich kleinere „Verschmelzungsfrequenz“. So werden schon bei 25 Bildern je Sekunde kontinuierliche Bewegungen wahrgenommen.

## 8.5. Raum- bzw. Tiefensehen



Stereosehen: Infolge unterschiedlicher Einfallswinkel für die beiden Augen, werden verschiedene entfernte Objekte nicht auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet: Es entsteht eine Disparität, die vom Sehapparat als Distanzinformation verwendet wird ( $a1 \rightarrow b1 < a2 \rightarrow b2$ ). Mit Stereogrammen (z.B. „Random-Dot“) wird diese Fähigkeit für 3D-Effekte nutzbar gemacht.

Der Horopter ist der geometrische Ort binokular ohne Disparität abgebildeter Sehobjekte. Theorie und Empirie weichen in der Peripherie voneinander ab. Im Panumbereich ist Sehen trotz Disparität ohne Doppelbild möglich. Ausserhalb ist kein Stereosehen mehr möglich; es entstehen Doppelbilder.

Disparität: Stereosehen

okulomotorische Faktoren:

Akkommodation

Vergenz

Bewegungsfaktoren: Stereokinetischer Effekt

Abbildungsfaktoren:

Überschneidung

Schattenbildung

Grösse (absolut, Seherfahrung)

Perspektive:

Linearperspektive

Grössenperspektive

Perspektivische Verkürzung

Texturgradient

Details in der Ferne gröber

Blaustich in der Ferne

Weitere Parameter des Raum- bzw. Tiefensehens: Das normale Stereosehen liefert zwar einen räumlichen Eindruck. Es reicht aber nicht für eine metrisch richtige Rekonstruktion des Raumes aus. Es ist vor allem für Manipulationen im Nahbereich (Greifraum) von Bedeutung. Ähnliches gilt für die Akkommodation und die Vergenz als Vermittler einer Distanzinformation. Je tiefer die Räume sind, um so wichtiger werden andere Kriterien. So spielt für die Wahrnehmung eines Raumes auch die Akustik eine Rolle. Räume, die optisch begrenzt, aber akustisch weit sind (schallarme Räume) werden als unangenehm wahrgenommen. Dasselbe gilt für Räume, die optisch weit, aber akustisch begrenzt sind.

## 8.6. Literatur

- Schmidt & Thews: Physiologie des Menschen; Kap. 11 Gesichtssinn.
- Schmidt R.F.: Neuro- und Sinnesphysiologie; Kap. 10.

- Anderson J.R.: Kognitive Psychologie; Kap. 2 (Teil).
- Lindsay, P.H., Norman D.A.: Human Information Processing; Kap. 2, 3, 6, 7.
- Rock, I.: Wahrnehmung. Vom visuellen Reiz zum Sehen und Erkennen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford (1985).
- Marr D.: Vision. Freeman & Co. New York (1982).
- Humphreys G.W., Bruce.: Visual Cognition. Lawrence Erlbaum, London (1989).

---

## 8.7. Fragen zum Sehen

---

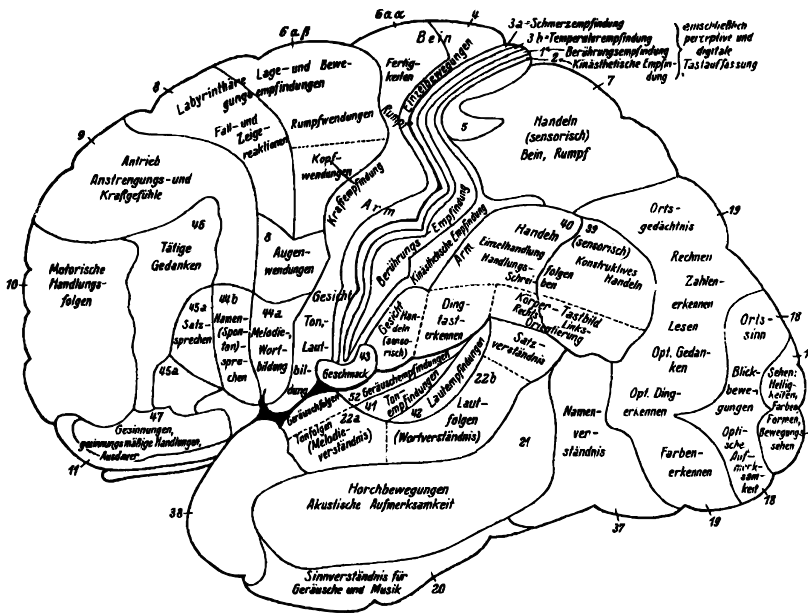
- 8-1 Die Einheit der Brechkraft heisst "Dioptrie" (dpt). Wie wird sie definiert? Was bedeuten die Ausdrücke „emmetrop“, „myop“, „presbyop“, „hyperop“ und „Akkommodationsruhelage“?
- 8-2 Unter welchen Bedingungen brauchen alte bzw. junge Menschen Brillen?
- 8-3 Der Fernpunkt eines Auges liegt bei 1.3 m, der Nahpunkt bei 19 cm. Welches Brillenglas würden Sie verschreiben? Wieviel Dioptrien beträgt die Akkommodationsbreite?
- 8-4 Durch welchen Mechanismus wird die Einstellung der Bildschärfe vollzogen?
- 8-5 Erklären Sie, wie es bei der Nah-Akkommodation des Auges zu einer Zunahme der Krümmungsradien der Linse kommt. Was spielen dabei die Zonulafasern und der Ziliarmuskel für eine Rolle? Durch welche vier Faktoren wird die Akkommodationssteuerung beeinflusst?
- 8-6 Erklären Sie die Begriffe "chromatische Aberration", "sphärische Aberration" und "Astigmatismus" sowie ihre Bedeutung für die Arbeit.
- 8-7 Welche Grössen kennen Sie, um die physikalischen Eigenschaften einer Lichtquelle zu charakterisieren?
- 8-8 Welche Beziehung besteht zwischen der Grösse der Pupille und dem Sehvorgang? Welche Vorteile bietet die Verkleinerung der Pupillenöffnung für den Sehvorgang?
- 8-9 Erklären Sie den Zweck und die Funktionsweise des Regelkreises für den Augeninnendruck. Erklären Sie in diesem Zusammenhang den Ausdruck "grüner Star" (Glaukom).
- 8-10 Erklären Sie die Ausdrücke "grauer Star" (Katarakt) und "Photokeratitis". Wie können solche Schädigungen des Auges entstehen?
- 8-11 Was wissen Sie über Aufbau, Verteilung und Funktion der Rezeptoren in der Retina?
- 8-12 In einer mondlosen, klaren Nacht schauen Sie zum Sternhimmel. Als Sie einen einzelnen, schwachen Stern fixieren wollen, ist er plötzlich nicht mehr sichtbar. Sie sehen den Stern nur, wenn Sie an ihm vorbeischaun und ihn nicht fixieren. Woran liegt das?
- 8-13 Was ist eine  $V(\lambda)$ -Kurve? Wie und warum ändert sich diese Kurve bei zunehmender Dunkelheit? Vergleichen Sie die Helligkeit zweier monochromatischer Lichtquellen gleicher Intensität, welche die Wellenlängen 550 nm und 400 nm aufweisen.
- 8-14 Sie erinnern sich an die Kurven gleicher wahrgenommener Lautstärke in phon aus der Akustik. Versuchen Sie eine analoge Grafik für die Helligkeitswahrnehmung zu erstellen.
- 8-15 Welche fünf Faktoren ermöglichen die Adaptation innerhalb des grossen Leuchtdichteumfangs von 1:1'000'000?
- 8-16 Was ist das Pulfrich-Phänomen, wie kommt es zustande? (Hinweis: zeitliche Verzögerung der Erregungsverarbeitung).
- 8-17 Erläutern Sie die Beziehung zwischen der physikalischen Einwirkung des Lichtes, dem Aktionspotential der Rezeptoren und der Wahrnehmung von Helligkeit.
- 8-18 Erklären Sie das rezeptive Feld von retinalen Ganglienzellen anhand der Wahrnehmung des Helligkeitsverlaufs an einer Kante. Welche Vorteile hat die Kontrastverstärkung?

- 8-19 Wie kommen Mach-Bänder zustande? Wo treten sie auf? Welche Vorteile bieten sie dem visuellen System? Kennen Sie Beispiele, wo diese deutlich werden?
- 8-20 Wie wird "Sehschärfe" definiert? Wie wird sie gemessen? Was bedeutet der Ausdruck "Visus"? Durch welche Massnahmen am Sehobjekt verbessert oder verschlechtert sich das Auflösungsvermögen einer Person?
- 8-21 Diskutieren Sie die folgenden Aussagen zum Farbsehen:
- Es gibt drei Primärfarben, nämlich Rot, Grün und Blau. Dies erkennt man daran, dass mit Farbbildschirmen, welche Pixel dieser drei Farben aufweisen, im Prinzip alle Farbtöne dargestellt werden können.
  - Es gibt vier Primärfarben, nämlich Rot, Grün, Gelb und Blau. Dies erkennt man daran, dass sich sowohl das Rot-Grün-, als auch das Gelb-Blau-Paar aus Komplementärfarben zusammensetzt, welche sich additiv gemischt zu Weiss ergänzen.
- 8-22 Wieviele Kenngrössen brauchen Sie, um eine Farbe zu beschreiben? Kann man Farbwahrnehmung auch bei schwarz-weiss-Objekten erleben?
- 8-23 Welchen Einfluss hat das Fehlen eines Zapfentyps auf die Farbwahrnehmung? Warum sind Männer von der Farbfehlsichtigkeit häufiger betroffen als Frauen?
- 8-24 Ein Rot-Grün-Farbenblinder (Deuteranoper oder Protanoper) kann die Farben Rot, Gelb und Grün nicht unterscheiden. Welche dieser drei Farben sieht er tatsächlich? Was halten Sie von dieser Frage?
- 8-25 Welche Adaptationseffekte sind Ihnen im Zusammenhang mit bewegten Mustern bekannt?
- 8-26 Wie kann das Sehsystem unterscheiden, ob die Bewegung eines Lichtpunktes auf der Retina auf eine Eigenbewegung des Auges oder eine Bewegung des Lichtpunktes zurückzuführen ist? Welche Erklärungen sind denkbar und welche stimmt am besten mit den experimentellen Befunden überein?
- 8-27 Beschreiben Sie, was eine Person sieht, die ihr Sehzentrum für Bewegungssehen durch einen Unfall verloren hat. Welches Probleme hat sie?
- 8-28 Warum sehen Sie im Kino keine schnelle Diashow (was es eigentlich ist)? Worauf beruht die Wahrnehmung von kontinuierlichen Bewegungen?
- 8-29 Welche Faktoren tragen dazu bei, die räumliche Entfernung von Objekten zu bestimmen? Was ist Stereosehen?
- 8-30 Warum sehen Sie auf Landschaftsbildern räumlich, obwohl Sie ein Fläche vor sich haben?

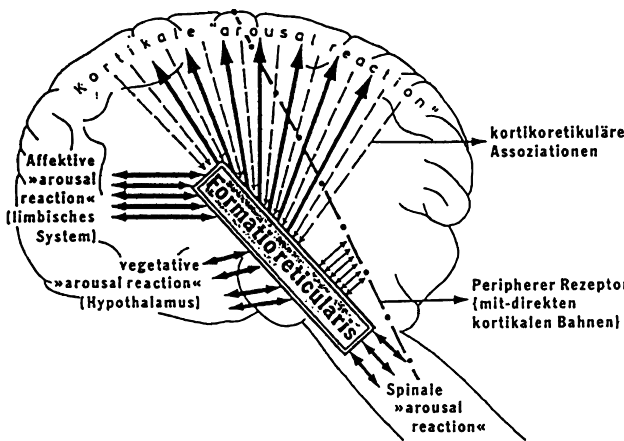


# 9. Kognition

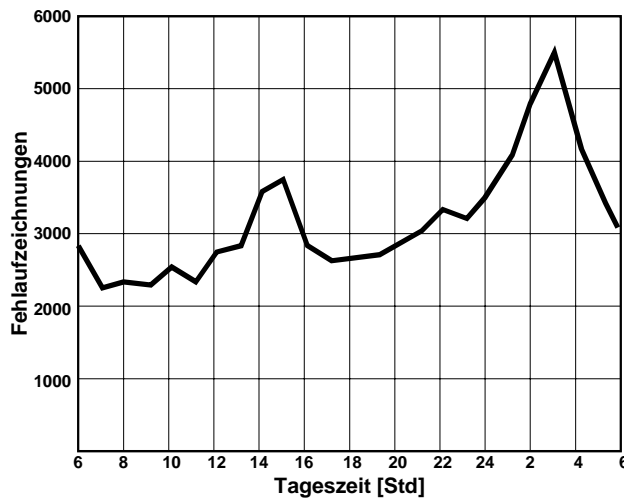
## 9.1. Organisation des Cortex und "Begleitreaktionen"



Topographie des Cortex: Verteilung, hierarchischer Aufbau, Funktionsareale.

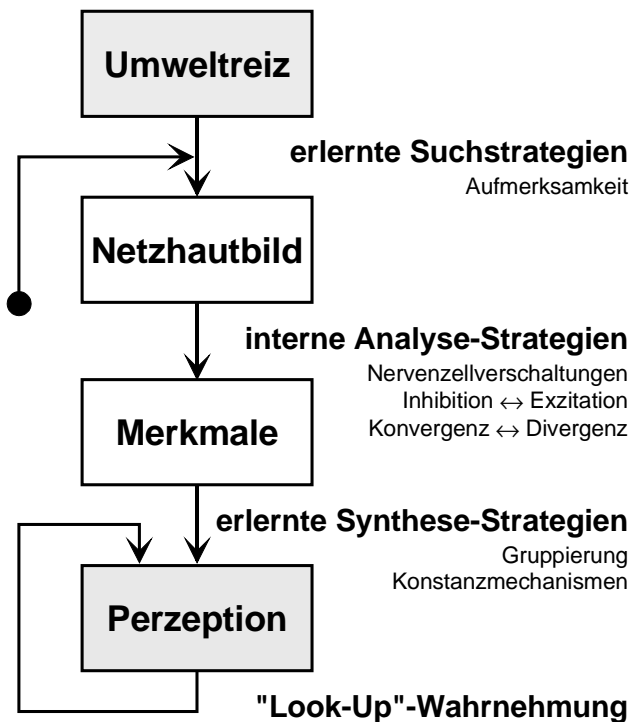


Formatio reticularis: Ein Netzwerk von im Stammhirn verstreuten und miteinander verbundenen Neuronen. Diese Struktur erfüllt wichtige Funktionen im Dienste des motorischen, sensorischen und vegetativen Systems. Seit längerer Zeit ist bekannt, dass eine Reizung der Formatio reticularis bei schlafenden Katzen eine sofortige Weckreaktion (arousal reaction) hervorruft. Vermittelt wird diese Reaktion durch das aufsteigende retikuläre aktivierende System (ARAS).

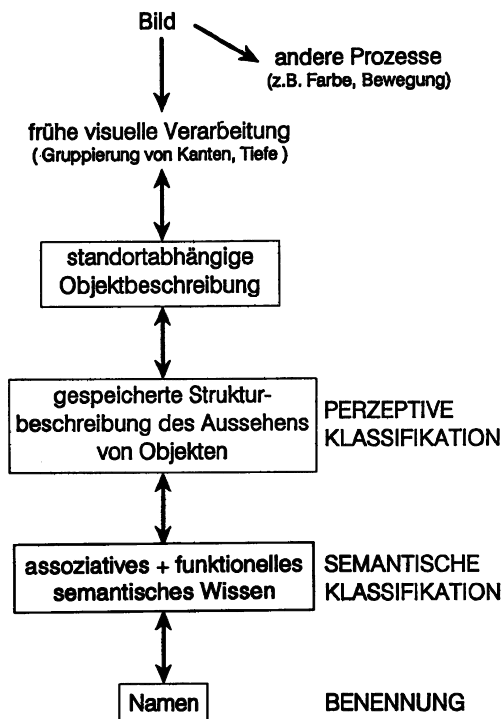


Circadiane Rhythmik: Sie bewirkt eine Tageszeitabhängigkeit der Vigilanz und damit der Aufmerksamkeit. Dargestellt ist die Verteilung von 75000 Fehlaufzeichnungen in schwedischen Gaswerken auf die einzelnen Tageszeiten (nach Bjerner et al., 1955).

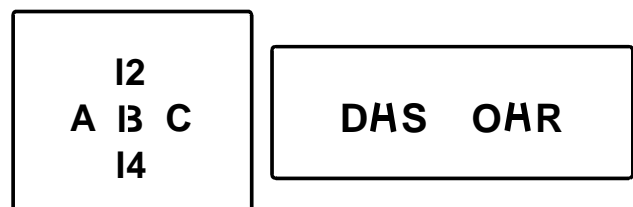
## 9.2. Modelle der Muster- und Objekterkennung



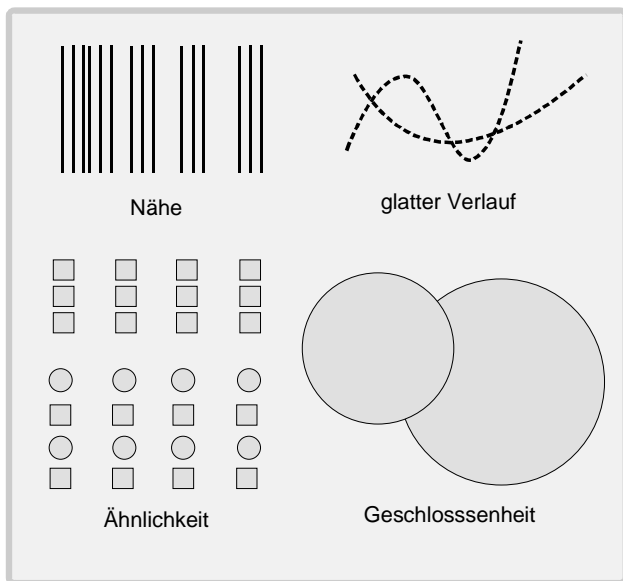
Analyse und Synthesestrategien: Der Prozess der Informationsverarbeitung im Nervensystem ist nichtlinear. Der bewusste Informationsfluss ist sehr klein. Dadurch, dass aber ganze Informationseinheiten im Laufe des Lernens gebildet werden können, ist der Informationsprozess selektiv sehr effizient. Ein wesentliches Merkmal der Verarbeitung der sensorischen Information im Nervensystem ist die Reduktion auf Merkmale bzw. Kodierungseinheiten. Elemente verschiedener Merkmale können parallel aufgenommen werden. Elemente eines Merkmals können nur sequentiell aufgenommen werden. Zu den Merkmalen gehören angeborene und erlernte Synthesestrategien, die dann zu dem gesehenen sensorischen „Bild“ im Kopf führen. Das Nervensystem arbeitet nicht mit technischen Bits und Bytes, sondern mit erlernten Informationseinheiten (chunks). Das sensorische Bild wird in Merkmale, bzw. Kodierungseinheiten zerlegt. Beispiele für solche Merkmale sind: Position, Farbe, Form, Kreuzungen und Linienform. Für die „Rekonstruktion“ des „internen Bildes“ gibt es grundlegende Wahrnehmungsprozesse wie die Konstanzmechanismen und die Prinzipien der Gestaltwahrnehmung bzw. Gruppierung (siehe dazu das nächste Kapitel).



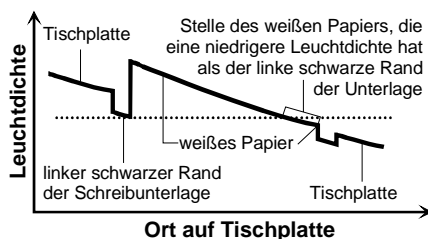
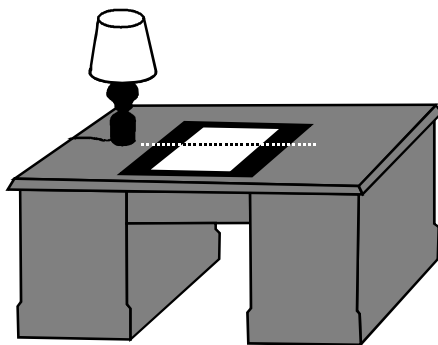
Modell zur Objekterkennung (nach Humphreys+Bruce, 1989): Vom Bild auf der Netzhaut bis zum Erkennen, Identifizieren und Benennen eines Objekts finden mehrere Abstraktionsschritte statt (datengesteuert). Wesentlich dabei ist, dass die Seherfahrung dafür unabdingbar ist (konzeptgesteuert). Im Bild sind daher meistens Doppelpfeile eingetragen. Die beiden unten dargestellten Texte können nur auf Grund der Seherfahrung erkannt werden. Weitere Hinweise folgen im Kapitel über das Gedächtnis.



### 9.3. Wahrnehmungsprozesse

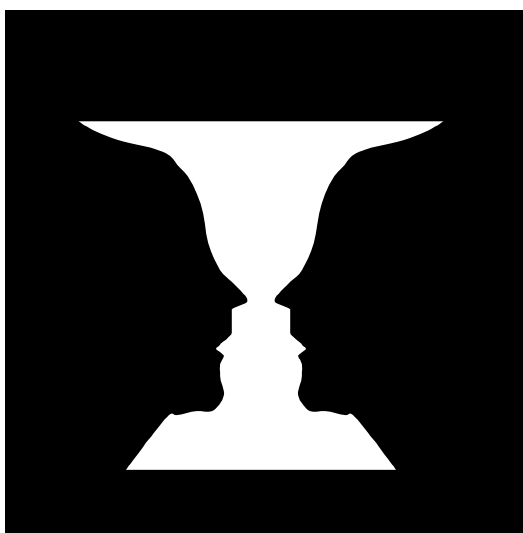


**Gruppierung:** Prinzipien der Gestaltwahrnehmung erlauben die Rekonstruktion des „internen“ Bildes aus Merkmalen. Neben den wichtigen dargestellten Prinzipien wurden von den Gestaltpsychologen noch viele andere postuliert (z.B. Prinzip des „gemeinsamen Schicksals“). Gruppierungsprinzipien beschränken sich nicht nur auf das Sehen. Analoge Prinzipien konnten beispielsweise auch beim Hören identifiziert werden.



**Konstanzmechanismen:** Formkonstanz (Größenkonstanz, Winkelkonstanz), Lichtkonstanz (Helligkeitskonstanz, Farbkonstanz); Bewegungskonstanz (Geschwindigkeitskonstanz, Richtungskonstanz), Positionskonstanz (Lagekonstanz, Orientierungskonstanz).

Für den Aufbau des „internen“ Bildes sind verschiedene Konstanzmechanismen von Bedeutung. Auch wenn sie hier nur für das Sehen aufgeführt sind, gibt es ähnliche Konstanzmechanismen für das Hören und für andere Sinne. Als Beispiel dargestellt ist die Helligkeitskonstanz: Obwohl eine Stelle des weissen Papiers dunkler ist als eine Stelle der schwarzen Unterlage, sehen wir das Papier weiss.



**Figur-Grund-Unterscheidung:** Der mentale Prozess einer Unterscheidung zwischen Figur und Grund wurde von E. Rubin 1921 beschrieben (Bild: Rubinsche Vase). Die Begriffe Figur und Grund drücken jedoch nur einen Teilaspekt davon aus. Ausschlaggebend für die Formwahrnehmung sind die Grenzlinien zwischen Flächen. Wir müssen entscheiden, welchem durch sie begrenzten Teil wir sie zuordnen müssen. Bei Bildern wie der Rubinschen Vase findet die Zuordnung ähnlich oft zur einen wie zur anderen Seite statt. Oft begünstigen aber geschlossene Linien, Symmetrien und Orientierungen oder aber die Seherfahrung die eine der beiden Zuordnungen.



Kippbilder bzw. Umkehrung der Wahrnehmung: Beispiel eines Übergangs von einem mentalen Konzept zu einem anderen: Bei Blick von links nach rechts wechselt das mentale Konzept „Mann“ in ein Konzept „Frau“. Von rechts nach links findet der Übergang an einer anderen Stelle statt. Man spricht daher von Wahrnehmungshysterese.

#### 9.4. „Look-Up“-Wahrnehmung

R.L. Gregory unterscheidet zwei Modelle der Wahrnehmung: Das Reiz-Antwort-System und die „Look-Up“-Wahrnehmung. Was ist ein Reiz-Antwort-System? Es arbeitet im wesentlichen dadurch, dass ein äusserer Reiz über ein Netz „innerer Schalter“ direkt eine Antwort steuert oder kontrolliert: Die Verkehrsampel wechselt von rot nach grün, als Antwort wechselt der Autofahrer seinen Fuss vom Brems- zum Gaspedal. Typisch für solche Systeme sind die damit verbundenen Reaktionszeiten. Nach der Theorie der „Look-Up“-Wahrnehmung hingegen, liegen mentale Konzepte möglicher Umweltgestaltungen bereits als Seherfahrung vor. Durch Information vom Auge wird das passendste oder das wahrscheinlichste Konzept ausgewählt und zur Wahrnehmung gebracht. Wie die Wahrnehmungshysterese im Zusammenhang mit Kippbildern zeigt, können gleichmässige Änderungen in der Sinnesinformation zu einer sprunghaften Änderung des ausgewählten mentalen Konzepts führen.

Mentale Konzepte sind im menschlichen Gedächtnis (in der „Look-Up-Tabelle“) gespeichert. Der Mensch eignete sie sich in seinem Kulturkreis im Laufe der Evolution und der Entwicklung nach der Geburt sowie in seiner unmittelbaren Vergangenheit an. So beinhaltet das mentale Konzept, welches wir von einem weissen Papier haben, die Tatsache, dass kontinuierliche Hell-Dunkel-Wechsel keine Eigenschaften der betrachteten Fläche sind (siehe Helligkeitskonstanz). Durch Information vom Auge wird das passendste oder das wahrscheinlichste Konzept ausgewählt und zur Wahrnehmung gebracht.

Im Gegensatz zu Reiz-Antwort-Systemen besitzt eine „Look-Up“-Wahrnehmung die folgenden vier, auf den ersten Blick überraschenden, jedoch überlebenswichtigen Vorteile:

**a)** Die „Look-Up“-Wahrnehmung kann ohne Zeitverzögerung arbeiten. Es sind nicht nur mentale Konzepte über das Aussehen von Objekten

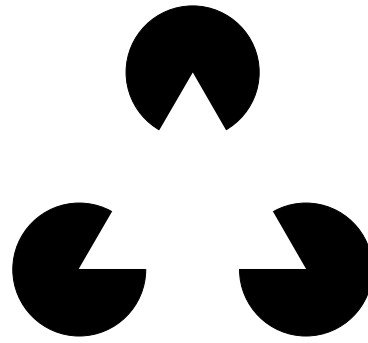
abrufbar, sondern auch solche über die Veränderungen der Umwelt mit der Zeit. Die „Look-Up“-Wahrnehmung schliesst aus dem abgespeicherten Bekannten mit einer gewissen Fehlerwahrscheinlichkeit auf das Zukünftige. Das heisst, ein mentales Konzept beinhaltet auch die Information, welches Konzept mit welcher Wahrscheinlichkeit den nächsten Umweltzustand beschreibt. Dadurch können Reaktionen bereits zu einem Zeitpunkt ausgelöst werden, für welchen die Sinnesinformation noch keine Entscheidung zulässt. Ein bekanntes Beispiel ist das Fangen eines heranfliegenden Balls. Die Handbewegung muss bereits in Gang gesetzt werden, wenn der Ball auf seiner Flugbahn noch unerreichbar weit entfernt ist. Da ein mentales Konzept der Flugbahn vorliegt, kann auf die zukünftige Position des Balls geschlossen werden. Für die visuelle Beurteilung eines beleuchteten Innenraumes ist diese Unabhängigkeit von einer Verarbeitungsgeschwindigkeit unerlässlich: Die Beurteilung erfolgt in kurzer Zeit, obwohl dem Auge eine sehr grosse Datenmenge in Form von Licht- und Farbwerten dargeboten wird.

**b)** Die „Look-Up“-Wahrnehmung kann auf Eigenschaften schliessen, welche nicht direkt durch die Sinne wahrnehmbar sind. So ist man etwa in der Lage, durch Anschauen eines Tisches seine Kratzfestigkeit zu beurteilen. Dies erfolgt natürlich nicht durch eine Eigenschaft des Lichts, welche „Härte“ signalisiert. Vielmehr wird durch die Sehinformation das mentale Konzept eines Tisches mit ähnlichem Aussehen aktiviert. Dieses Konzept liefert dann die Information über den Härtegrad. Man darf sich das mentale Konzept eines Tisches nicht als „Bild“ des Tisches vorstellen. Unter anderem ist das Konzept im Gegensatz zu einem Bild unabhängig von den Beleuchtungsbedingungen und von der Lage und Orientierung des Tisches im Raum (→ Wahrnehmungskonstanz). Tatsächlich entsteht im allgemeinen beim Einschalten einer künstlichen Beleuchtung nicht der Eindruck,

dass sich die Helligkeit der Tischfarbe ändert. Die Information, dass Tische ihre Farbe nicht wie Chamäleons wechseln, steckt ähnlich wie beim Härtegrad, im mentalen Tisch-Konzept. Ein Reiz-Antwort-System könnte diese „Reflexionsgradkonstanz“ nicht in nützlicher Zeit liefern, da es – ohne Seherfahrung – nur die Reizstärke der Sehrezeptoren als Information hat, welche mit dem Ansteigen der Beleuchtungsstärke ebenfalls zunehmen.

**c)** Die „Look-Up“-Wahrnehmung kann auf Abwesenheit von Eigenschaften reagieren. Das klassische Beispiel dazu ist das Kanizsa-Dreieck (Bild). Obwohl die Seiten des weissen Dreiecks nicht ausgezogen sind und somit auch kein Bild auf der Netzhaut des Auges erzeugen, werden sie wahrgenommen. Dass das Fehlen eines Reizes eine Reaktion auslösen kann, ist bei einem Reiz-Antwort-System nicht möglich. Am Beispiel der sogenannten psychologischen Blendung ist jedoch zu erkennen, dass der Mensch darauf reagiert. Er fühlt sich durch eine Blendquelle – z.B. eine grelle Lampe im Blickfeld seines Arbeitsplatzes – belästigt (=Antwort), weil diese zwar Aufmerksamkeit erregt, aber keine Information bietet (=fehlender Reiz). Die Sehleistung wird nicht notwendigerweise beeinträchtigt. Bei ausreichendem Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung führt hingegen ein Fenster mit Blick ins Freie kaum zu psychologischer Blendung, auch

wenn die Rezeptoren des Auges stärker als bei der Lampe gereizt werden.



Kanizsa-Dreieck: Die fehlende Information über dessen Kanten wird aus einem mentalen Konzept „drei schwarze Kreise mit überlagertem weissem Dreieck“ gewonnen. Die „Look-Up“-Wahrnehmung bildet Annahmen darüber, welches Konzept der objektiven Wirklichkeit am ehesten entspricht. Ein Konzept „drei schwarze, angeschnittene Kuchen ohne Dreieck“ erhält offenbar aufgrund der Seherfahrung eine geringere Wahrscheinlichkeit.

**d)** Die „Look-Up“-Wahrnehmung kann kurzzeitige Informationslücken ausfüllen. Dies erfolgt z.B. beim Lidschlag. Obwohl das Bild auf der Netzhaut des Auges verschwindet, wird die Umwelt zeitlich als kontinuierlich wahrgenommen.

## 9.5. Gedächtnis

### 9.5.1. Gedächtnisstufen

	sensorisch	primär	sekundär	tertiär
<b>Kapazität</b>	durch die von Rezeptoren übertragene Information begrenzt	7 bit	sehr gross	sehr gross
<b>Speicherzeit</b>	Sekundenbruchteile	mehrere Sekunden	mehrere Minuten bis zu Jahren	dauernd
<b>Aufnahme in den Speicher</b>	automatisch bei der Wahrnehmung	Verbalisierung	Üben	sehr häufiges Üben
<b>Speicherzugriff</b>	nur durch Ausgabegeschwindigkeit	sehr schneller Zugriff	langsamer Zugriff	sehr schneller Zugriff
<b>Informationsform</b>	sensorisch	verbal	alle Formen	alle Formen
<b>„Vergessen“</b>	Verblässen, Auslöschen	neue Information ersetzt alte	Interferenz pro-, retroaktive	möglicherweise kein Vergessen

### 9.5.2. Standardtheorie der menschlichen Informationsverarbeitung

Gemäss der Standardtheorie menschlicher Informationsverarbeitung unterscheidet man einen *sensorischen Speicher*, sowie ein *Kurzzeit-* und ein *Langzeitgedächtnis*. Von ihrer Aufgabe her könnte man sie mit dem „Input-Buffer“, dem Arbeitsspeicher und dem Festplattenspeicher eines Computers vergleichen. Als „Input“ dient die Information, welche über die Sinnesorgane in den sensorischen Speicher gelangt. Von dort wird sie

in geeigneter Form zum Kurzzeitgedächtnis gebracht (=datengesteuert), verarbeitet und entweder ins Langzeitgedächtnis übertragen oder als „Output“ verwendet (Sprache, Bewegung etc.). Für die Verarbeitung im Kurzzeitgedächtnis (Arbeitsgedächtnis), kann auch Information aus dem Langzeitgedächtnis verwendet werden (=konzeptgesteuert).

### 9.5.3. sensorischer Speicher

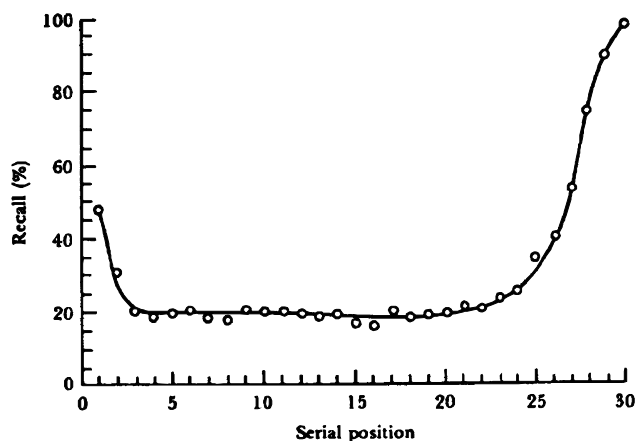
Es lassen sich für die Sinnesmodalitäten unterschiedliche sensorische Speicher nachweisen. So gibt es z.B. einen „echoischen Speicher“ des Hörens und einen „ikonischen Speicher“ des Sehens. Deren Kapazität ist gross, aber die Speicherzeit beträgt nur Sekundenbruchteile. Letzteres ist an der „Vergessenskurve“ zu erkennen: In einem Tachistoskop, einem Gerät zur kurzzeitigen Präsentation optischer Reize, wurden für eine Dauer von 50 ms neun Buchstaben in einer 3x3-Matrix Anordnung gezeigt (Sperling, 1959). Nach einer variablen Zeitdauer (=Delay) wurde ebenfalls für 50 ms ein Balken gezeigt, der die Stelle in der 3x3-Matrix markierte, aus welcher der eben gesehene Buchstabe genannt werden

sollte. Betrag der Delay weniger als 200 ms, konnten die meisten Buchstaben erinnert werden; d. h., die Information war noch aus dem sensorischen Speicher abrufbar. Bei längerem Delay wurden nur etwa 40% der Buchstaben erinnert; das ist die Information, welche bereits ins Kurzzeitgedächtnis gelangt ist. Der Inhalt des sensorischen Speichers wird durch neue Information überschrieben (z.B., wenn statt des Balkens ein anderer Marker verwendet wird oder beim natürlichen Sehen infolge Blickbewegungen). Die sensorischen Speicher sind notwendig, um zeitlich ausgedehnte Ereignisse als Informationseinheit zur Verfügung zu haben (insbesondere akustische Information).



Das Langzeitgedächtnis ist am ehesten mit dem „Memory-See“ im Pandämonium gleichzusetzen (Lindsay+Norman, 1977). Im Langzeitgedächtnis werden durch Lernen ganze mentale Konzepte der erfahrenen Umwelt abgespeichert. Im visuellen Teil des Langzeitgedächtnisses ist dies beispielsweise die standortunabhängige „Strukturbeschreibung des Aussehens von Objekten“ (Humphreys+Bruce, 1989). Aber auch das Wissen der Bedeutung, Funktion und Namen von Objekten sind Inhalt des Langzeitgedächtnisses. Wie erwähnt, besteht eine Möglichkeit des Lernens in der ständigen Wiederholung des Kurzzeitgedächtnisinhalts. In einem Versuch mussten Wörter im Abstand von einer Sekunde gelernt werden; insgesamt 30 Wörter (Murdock 1962). Danach hatten die Personen 1.5 Minuten Zeit, die erinnerten Wörter niederzuschreiben. Die zuletzt präsentierten 5 bis 7 Wörter konnten gut erinnert werden, wenn sie sofort aufgeschrieben wurden: Sie waren noch im Kurzzeitgedächtnis abgelegt. Von den anderen Wörtern wurden etwa 20% erinnert; diese waren gelernt und daher im Langzeitgedächtnis gespeichert. Das erste Wort wurde jedoch zu 47%, das zweite zu 30% erinnert. Diese beiden Wörter waren länger im Kurzzeitgedächtnis als die folgenden, weil dieses zu Anfang noch nicht gefüllt war. Dadurch stand für den Übergang ins Langzeitgedächtnis mehr Zeit zur Verfügung. Eine andere Möglichkeit zu lernen ist, mit angemessener Aufmerksamkeit ein Verständnis für die aufgenommene Information zu entwickeln. Das heisst beispielsweise,

dass der Inhalt eines Vortrags in das bereits vorhandene Netz des Langzeitwissens „eingeflochten“ wird. Man kann sich dann zwar nicht wie bei der Methode des ständigen Wiederholens an den Wortlaut im einzelnen erinnern, jedoch an die wesentlichen Inhaltzusammenhänge. Ein weiteres Beispiel für dieses Verfahren ist das Lernen mit Hilfe von Eselsbrücken: Die neu gespeicherte Information wird über einen bereits gespeicherten Zusammenhang zugänglich gemacht. Bei beiden Methoden ist ein Aufwand an Aufmerksamkeit erforderlich. Dies fällt bei uninteressanten Themen viel schwerer, wodurch diese auch schwieriger zu lernen sind. Die Aufmerksamkeit kann nicht gleichzeitig die Aufgabe „Aufnahme externer Information“ und „Abrufen von Gedächtnisinhalten“ erledigen. Dadurch fällt es schwer, beispielsweise in einer Vorlesung sowohl zuzuhören, als auch über die inhaltlichen Zusammenhänge nachzudenken. Dass es in beschränktem Rahmen dennoch möglich ist, liegt daran, dass die Sprache Information mehrfach enthält (Redundanz). Das heisst, man kann ab und zu weghören, ohne den Zusammenhang zu verlieren. Die im Langzeitgedächtnis abgelegte Information kann zum Teil durch Lernen oder Nachdenken modifiziert und dadurch „vergessen“ werden (sekundäre Gedächtnisstufe) vieles ist jedoch „unvergessbar“ abgelegt (z.B.: Konstanzmechanismen) (tertiäre Gedächtnisstufe). Ob „vergessene“ Information tatsächlich gelöscht ist oder nur im Langzeitgedächtnis nicht mehr zugänglich, wird kontrovers diskutiert.

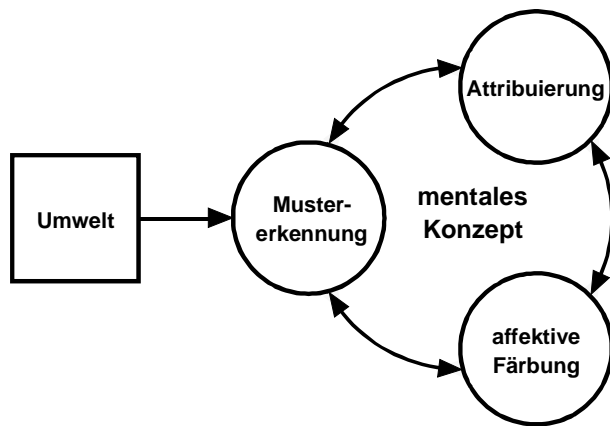


Lang- und Kurzzeitgedächtnis: Dargestellt ist der Anteil der Wörter, welche korrekt erinnert werden konnten in Abhängigkeit ihrer Präsentationsreihenfolge. Die zuletzt gezeigten Wörter (Kurvenanstieg rechts) sind zum Teil noch im Kurzzeitgedächtnis abgelegt; die vorhergehenden Wörter (in der Kurve mitte und links) im Langzeitgedächtnis.



## 9.6. Emotionale Bewertung

### 9.6.1. Verhaltensebenen



physiologisch – humoral

motorisch – verhaltensmässig

subjektiv – psychologisch (siehe Bild: Modell der subjektiven Welt der mentaler Konzepte).

### 9.6.2. Affektive Färbung

Jeder Reiz hat nicht nur rationale, in Mustern fassbare Eigenschaften. Immer werden wir gleichzeitig den wahrgenommenen Reiz auch auf einer emotionalen Ebene erleben. Der Reiz wird affektiv bewertet, das heisst, wir empfinden unsere Umwelt und ihre Objekte als angenehm oder unangenehm, als beruhigend oder anregend und wir fühlen uns einer Situation ausgeliefert oder glauben, sie kontrollieren zu können.

Farbzusammenstellungen belegen wir mit einer gefühlsbetonten Bedeutung. Manche Farben empfinden wir als angenehm und andere als unangenehm. Wir sprechen von aggressiven oder beruhigenden Farben. Selbst Formen und Gestalten unterliegen einer affektiven Bewertung. Aber, im Gegensatz zur Mustererkennung, unterliegen affektive Bewertungen dem Wandel der Zeit. Es gibt somit eine akustische und visuelle Historie. Formen von Kraftfahrzeugen, die wir

heute attraktiv und spannend finden, beurteilen wir 10 Jahre später als uninteressant oder gar langweilig.

Mustererkennung und affektive Bewertung beeinflussen sich gegenseitig. Wir sind geneigt affektiv uninteressante Reize zu unterdrücken. Zwar ist der Reiz sehr stark mit der objektiven Welt verbunden, doch wird die Wechselbeziehung zwischen Reiz und Mustererkennung deutlich von der affektiven Wertung beeinflusst, wie die Beurteilung von Lärmereignissen zeigt. So wird etwa von Jugendlichen Musik in der Diskothek affektiv als angenehm und anregend empfunden und daher trotz erheblichen Schallpegels nicht als störend und ärgerlich bewertet. Der physikalisch gemessene, objektive Schallpegel erklärt daher im besten Falle nur ein Drittel der Reaktionen der Bevölkerung auf den Lärm.

### 9.6.3. Attribuierung

Auf einer gedanklich höheren Stufe nehmen wir oft zusätzlich eine Bewertung im Sinne einer Attribuierung vor. Wir haben eine Vorstellung darüber, ob sich das Wahrgenommene positiv oder auch negativ auf unsere Gesundheit auswirkt. Ein Beispiel dafür ist die öffentliche Diskussion über das „unnatürliche“ und daher (!) „ungesunde“ Lichtspektrum von Leuchtstofflampen. So hört man oft die Behauptung, „Neonröhrenlicht macht krank“ – das mentale Konzept über Leuchtstofflampen wird mit einem Konzept über die Gesundheit verknüpft.

Wir stellen auch fest, ob ein architektonischer Raum eher modern oder altmodisch wirkt, ob er

eher eine private oder öffentliche Atmosphäre ausstrahlt. Indirektes Licht wird von Architekten manchmal als passives und direktes als aktives Licht bezeichnet. Wir sprechen von kalten oder warmen Farben. Solche Verknüpfungen mentaler Konzepte müssen nicht mit den naturwissenschaftlich begründbaren Verknüpfungen in der objektiven Umwelt übereinstimmen. Im Volkstum verdirbt zu wenig Licht die Augen, obwohl es bisher keinen Hinweis in dieser Richtung gibt.

Glaube und Aberglaube – die Attribuierung – bestimmen das weitere Verhalten gegenüber dem Wahrgenommenen. Die Attribuierung beeinflusst sowohl die affektive Färbung als auch den Prozess der Mustererkennung. Das

den Prozess der Mustererkennung. Das heisst, sie bestimmt mit, welches mentale Konzept von der „Look-Up“-Wahrnehmung ausgewählt wird. Da die Attribuierung unabhängig von der erkannten naturwissenschaftlichen Realität ist, kann sie

auch nur schwer mit rationalen, naturwissenschaftlichen Argumenten erfasst werden. Es gibt eine von der Naturwissenschaft abweichende subjektive Realität, die zumindest in der öffentlichen Diskussion berücksichtigt werden muss.

---

## 9.7. Literatur

---

- Schmidt & Thews: Physiologie des Menschen; Kap. 6.
- Schmidt R.F.: Neuro- und Sinnesphysiologie; Kap. 15 bis 19).
- Anderson J.R.: Kognitive Psychologie; Kap. 2-6.
- Lindsay, P.H., Norman D.A.: Human Information Processing; Kap. 7, 8, 9 und 17.
- Humphreys G.W., Bruce.: Visual Cognition. Lawrence Erlbaum, London (1989).
- Ashcraft M.H.: Human Memory and Cognition. 2nd Ed. Harper Collins (1994).
- Mehrabian A.: Räume des Alltags oder wie die Umwelt unser Verhalten bestimmt. Campus Verlag Frankfurt, New York (1978) (populärwissenschaftlich).

---

## 9.8. Fragen zur Kognition

---

- 9-1 Was versteht man unter folgenden Gruppierungsprinzipien der visuellen Wahrnehmung: „gemeinsames Schicksal“, „gute Gestalt“, „Geschlossenheit“ und „Ähnlichkeit“? Beispiele?
- 9-2 Erklären Sie anhand eines Beispiels, was unter "Konstanz der Winkel" gemeint ist. Kennen Sie noch andere Konstanzmechanismen?
- 9-3 Wie ist es möglich, dass Sie die Grösse einer Person weitgehend unabhängig davon schätzen können, in welcher Entfernung sie sich befindet?
- 9-4 Was hat das Gedächtnis für einen Einfluss auf die visuelle Wahrnehmung? Beispiele?
- 9-5 Beim Eintippen einer Telefonnummer wird man gestört und stoppt den Vorgang. Nach der Störung versucht man dort fortzufahren wo man aufgehört hat. Leider stellt man fest, dass die unterbrochene Handlung nicht rekapitulierbar ist. Wie erklären Sie dies?
- 9-6 Oft sind die Hörer eines Vortrags überfordert, wenn der Referent in kurzer Zeit zu viele Folien zeigt. Im Kino jedoch sehen wir 24 Bilder pro Sekunde und sind dennoch nicht überfordert. Was ist die Ursache für diese unterschiedliche Überforderung? Könnte man diese Ursache messtechnisch erfassen? Wo liegt die Problematik einer solchen Messung?
- 9-7 Warum soll man eine Ansprache oder einen Vortrag mit ein paar Floskeln beginnen?
- 9-8 Beschreiben Sie die Eigenschaften des sensorischen Speichers und des Kurz- und Langzeitgedächtnisses. Berücksichtigen Sie insbesondere Kapazität, Speicherzeit, Geschwindigkeit, Informationsform und die Art des Vergessens.
- 9-9 Was bedeutet der Satz: "Die Redundanz der Sprache erlaubt ein Vorausdenken"?
- 9-10 Was wird mit einem Tachistoskop untersucht? Warum ist es ein wichtiges Instrument der Experimentalpsychologie?
- 9-11 Was sagt Ihnen der Begriff "Merkmalsfilter"?
- 9-12 Was bedeuten die Begriffe „Vigilanz“, „Trigger“, „Formatio reticularis“, „circadiane Rhythmik“?